

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ВЕРСТАТІВ ТА МАШИН

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_ 62-8 \_\_\_\_\_

До захисту допущено

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.Б.Струтинський

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

на тему: Методи проектування та дослідження конкурентопридатних  
модульних мехатронних шпиндельних вузлів.

Виконав (-ла): студент (-ка) \_\_\_\_\_ ІІ курсу , групи МВ – 71мп

\_\_\_\_\_ Алексик Ілля Ігорович

\_\_\_\_\_ (прізвище ім'я по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник

\_\_\_\_\_ Верба І.І.

\_\_\_\_\_ (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з розділу

\_\_\_\_\_ (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент: Бецко Ю.М.

\_\_\_\_\_ (посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає  
запозичень з праць інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_ (підпис)

Київ - 2018

**Національний технічний університет України**  
**“Київський політехнічний інститут**  
**імені Ігоря Сікорського”**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра конструювання верстатів та машин**

Рівень вищої освіти другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація «Технології комп'ютерного проектування верстатів, роботів і машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_В.Б.Струтинський  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Алексик Ілля Ігорови  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Методи проектування та дослідження конкурентопридатних модульних мехатронних шпиндельних вузлів.

науковий керівник дисертації: Верба І.І.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “15” листопада 2018 року № 934-с

2. Термін подання студентом дисертації:

3. Об'єкт дослідження: Вибір оптимального мотор-шпинделя для вертикально-фрезерного станка

4. Вихідні дані: Технічні характеристики та технічний опис шпиндельного вузла, а саме, швидкість обертання шпинделя

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Аналіз представлених на ринку шпиндельних вузлів, вибір найбільш оптимального по характеристикам ШВ

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 8 плакатів.

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: 25.09.2017

*КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН*

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Технічний опис базового верстату, його загальні робочі характеристики.	26.09.2017-01.12.2017	
2	Проблематика високошвидкісних ШВ, вибір електрошпинделя, схема обробки з використанням електрошпинделя.	02.12.2017-03.01.2018	
3	Аналітично інформаційне дослідження конструкції мехатронних електрошпинделів	06.02.2018-23.07.2018	
4	Вибір мехатронного шпиндельного вузла та його конструкції	01.09.2018-20.10.2018	
5	Спеціальне програмне забезпечення розрахунку шпиндельного вузла	21.10.2018-05.12.2018	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

**Алексик І.І.**  
(прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ Верба.І.І \_\_\_\_\_

## АНОТАЦІЯ

В даній магістерській дисертації були розглянуті методи проектування та дослідження конкурентоспроможних модульних мехатронних шпиндельних вузлів.

В розділі 1 наведено технічний опис базового верстату VDL-500 фірми DMTG та розглянуто його загальні робочі характеристики.

В розділі 2 наведено проблеми високошвидкісних шпиндельних вузлів.

В розділі 3 виконано вибір електрошпинделя, описано його процес та умови експлуатації. Наведена схема обробки з використанням електрошпинделя в обраному верстаті.

В розділі 4 було проаналізовано типи електродвигунів, їх відмінності та способи експлуатації.

В розділі 5 наведена оцінка параметрів швидкохідності шпиндельного вузла та формування переднього кінця шпинделя відповідно до діючих стандартів також виконано вибір матеріалу для шпинделя і технології термічної обробки.

В розділі 6 наведена конструкція високошвидкісного шпинделя та список основних компонентів.

В розділі 7 проведено аналітично інформаційне дослідження конструкції мехатронних електрошпинделів.

В розділі 8 аналізуються опори мехатронних шпиндельних вузлів.

В розділі 9 наведений вибір мехатронного шпиндельного вузла та конструкція і виробники шпиндельних вузлів.

В розділі 10 розглянуто спеціальне програмне забезпечення розрахунку ШВ.

Магістерська дисертація містить пояснювальну записку обсягом 96 сторінок, список літератури, який складається з 17 найменувань, 1 додаток та 8 аркушів графічної частини.

## Анотация

В данной магистерской диссертации были рассмотрены методы проектирования и исследования конкурентоспособных модульных мехатронных шпиндельных узлов.

В разделе 1 приведены техническое описание базового станка VDL-500 фирмы DMTG и рассмотрены его общие характеристики.

В разделе 2 приведены проблемы высокоскоростных шпиндельных узлов.

В разделе 3 выполнено выбор электрошпинделя, описано его процесс и условия эксплуатации. Приведенная схема обработки с использованием электрошпинделя в выбранном станке.

В разделе 4 были проанализированы типы электродвигателей, их различия и способы эксплуатации.

В разделе 5 приведена оценка параметров быстроходности шпиндельного узла и формирования переднего конца шпинделя соответствии с действующими стандартами также выполнен выбор материала для шпинделя и технологии термической обработки.

В разделе 6 приведена конструкция высокоскоростного шпинделя и список основных компонентов.

В разделе 7 проведено аналитически информационное исследование конструкции мехатронных Электроприводы.

В разделе 8 анализируются опоры мехатронных шпиндельных узлов.

В разделе 9 приведен выбор мехатронного шпиндельного узла и конструкция и производители шпиндельных узлов.

В главе 10 рассмотрены специальное программное обеспечение расчета ШВ.

Магистерская диссертация содержит пояснительную записку объемом 96 страниц, список литературы, состоящий из 17 наименований, 1 приложение и 8 листов графической части.

## Annotation

In this master's dissertation were considered methods of designing and researching competitive modular mechatronic spindle units.

In Section 1, a technical description of the DMTG basic machine VDL-500 is given and its general operating characteristics are considered.

Section 2 shows the problems of high-speed spindle nodes.

In section 3 the electrospindle selection is made, its process and operating conditions are described. The scheme of treatment using an electrospindle in the selected machine is given.

Section 4 analyzed the types of electric motors, their differences and their operation methods.

Section 5 gives an estimate of the speed parameters of the spindle node and the formation of the front end of the spindle in accordance with the existing standards, as well as the choice of material for the spindle and the heat treatment technology.

Section 6 shows the design of the high-speed spindle and a list of the main components.

In Section 7, an informational study of the design of mechatronic electric spindles is carried out.

Section 8 analyzes the supports of mechatronic spindle nodes.

Section 9 shows the choice of the mechatronic spindle assembly and the design and manufacturers of spindle units.

Section 10 deals with the special software for calculating the SW.

The master's thesis contains an explanatory note in the amount of 96 pages, a list of literature consisting of 17 titles, 1 supplement and 8 sheets of graphic part.



## **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>1. ТЕХНІЧНИЙ ОПИС БАЗОВОГО ВЕРСТАТУ VDL-500 ФІРМИ DMTG.....</b>	<b>7</b>
1.1. Загальні робочі характеристики верстату.....	11
1.1.1. Підшипники шпинделя.....	17
1.1.2. Шпиндель.....	18
<b>2. ПРОБЛЕМИ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ.....</b>	<b>21</b>
<b>3. ВИБІР ЕЛЕКТРОШПИНДЕЛЯ. ОПИС ПРОЦЕСУ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЙ.....</b>	<b>23</b>
3.1. Схема обробки з використанням електрошпинделя в обраному верстаті.....	23
<b>4. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....</b>	<b>31</b>
4.1. Типи електродвигунів.....	31
4.1.1. З пасовою передачею.....	31
4.1.2. Інтегрований у корпус шпинделя електродвигун.....	32
<b>5. ПРОЕКТУВАННЯ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА.....</b>	<b>35</b>
5.1. Оцінка параметрів швидкохідності шпиндельного вузла.....	35
5.2. Формування переднього кінця шпинделя відповідно до діючих стандартів.....	36



5.3. Вибір матеріалу для шпинделя і технологія термічної обробки..	37
5.4. Обґрунтування способу змащення.....	38
5.4. Обґрунтування способу змащування і розробки системи змащування. Визначення конструктивних параметрів ущільнень.....	38
5.5 Обґрунтування показники точність деталі, пов'язані з підшипниками.....	38
<b>6. КОНСТРУКЦІЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ШПИНДЕЛЯ, СПИСОК ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ.....</b>	<b>46</b>
<b>7. АНАЛІТИЧНО ІНФОРМАЦІЙНЕ ДОСЛІЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МЕХАТРОНИХ ЕЛЕКТРОШПИНДЕЛІВ.....</b>	<b>52</b>
7.1. Типові приклади.....	52
<b>8. ОПОРИ МЕХАТРОНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ.....</b>	<b>54</b>
8.1 Радіально-упорні підшипники й роликopідшипники.....	55
8.2 Гібридні керамічні підшипники.....	59
8.3. Види мастила підшипників.....	60
8.3.1 Перманентне мастило.....	60
8.3.2 Повітряно-масляне мастило.....	60
8.4. Критерії вибору мотора.....	63
8.5. Конструкція повітряного лабіринтового ущільнення.....	66
8.6. Системи кріплення інструменту.....	68
<b>9. ВИБІР МЕХАТРОНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА. КОНСТРУКЦІЯ ТА ВИРОБНИКИ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ.....</b>	<b>71</b>
9.1. Варіанти представлення виробником верстату.....	71
9.2. Компанії та задовільні варіанти шпинделних вузлів.....	77
<b>10. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....</b>	<b>89</b>

<b>Література.....</b>	<b>92</b>
<b>Додаток.....</b>	<b>94</b>

## ВСТУП

Шпиндельні вузли є найбільш відповідальними механізмами верстатів. Від досконалості конструкції, а також від якості виготовлення і збірки шпиндельного вузла багато в чому залежить точність обробки.

В останні роки в практиці верстатобудування намітилася тенденція до створення жорстких конструкцій шпинделів відносно невеликої довжини. Підвищення жорсткості шпинделів досягається за рахунок збільшення діаметра або площі поперечного перерізу, застосування додаткових опор, підвищення жорсткості опор кочення за рахунок створення попереднього натягу і т.д.

Для приводів обертання швидкісних і точних верстатів шпинделі виконують розвантаженими від дії згинального моменту шківи приводних ременів або шестерень.

Загалом ми можемо побачити велику кількість різноманітних варіантів шпиндельних вузлів, для кожної задачі ми можемо виділити більш задовільні варіанти для встановлення.

Робота базується на використанні знань та розрахунків для визначення параметрів та характеристик мехатронних шпиндельних вузлів, задля вибору найкращого варіанту, серед представлених на ринку обладнання. В кінці проекту ми повині отримати робочий варіант верстату з поліпшеними характеристиками. Проектування верстатів на основі мехатронних модулів і систем, що характеризуються якісно-новими експлуатаційними властивостями (високі швидкості робочих і допоміжних переміщень, потужність, точність, надійність, відсутність зазорів, скорочення кінематичних ланцюгів, зниження тертя і т.д.), вимагає серйозної інформаційної та теоретичної підготовки процесу конструювання, як при створенні самих мехатронних вузлів, так і їхній інтеграції

в конструкцію розроблюваного верстата. Гостро постає проблема збалансованості експлуатаційних властивостей елементів конструкції і забезпечення обґрунтованого вибору комплектуючих виробів (двигунів, підшипників, датчиків, муфт і т.д.) для вирішення якої необхідні математичні моделі, що дозволяють проводити імітацію і аналіз процесів в приводах верстата, і методи узгодженого вибору їхніх параметрів.

Одним з найважливіших вузлів, який значним чином визначає точність та якість обробки, особливо для верстатів швидкісних та прецизійних, є шпиндельний вузол. Мехатронні шпиндельні вузли є модулем руху, який як при проектуванні, так і при виборі у якості покупного комплектуючого вузла підпорядковується особливим вимогам високошвидкісної обробки (Hightspeedcutting (HSC)).

Для проектування та віртуального дослідження ШВ існує ряд методів та відповідне програмне забезпечення. Інформація, яка наявна у відкритих джерелах, потребує структуризації й узагальнення.

**Мета проекту.** Ми поставили перед собою таку задачу: поліпшення характеристик верстата для забезпечення високошвидкісних рухів формоутворення, як побічні: зменшення собівартості шпиндельного вузла, збільшення часу між технічним обслуговуванням та збільшення точності.

### **Шляхи досягнення мети**

Огляд особливостей та проблем високошвидкісної обробки в аспекті зв'язку з конструкціями і параметрами шпиндельних вузлів. Інформаційно аналітичне дослідження мехатронних шпиндельних вузлів які використовують як у нових верстатах та роботах, так і при осучасненні верстатів і роботів, які знаходяться в експлуатації. Дослідження ринку модульних вузлів в Україні

(основні виробники, чия продукція представлена) та вибір альтернативних мехатронних шпиндельних вузлів різних виробників. Огляд методик розрахунку високошвидкісних шпиндельних вузлів, особливостей проектування їх різними фірмами-виробниками.

## **1. ТЕХНІЧНИЙ ОПИС БАЗОВОГО ВЕРСТАТУ VDL-500 ФІРМИ DMTG**

Даний верстат застосовується в середньому і дрібносерійного виробництва. Він призначений для обробки пластин, дисків, валів та інших деталей і призначений для виготовлення прес-форм. Верстат оснащений системою управління FANUC - 0i яка дозволяє оптимізувати роботу верстата і здійснювати на ньому лінійну і кругову інтерполяцію. Верстат ідеально підходить для точного фрезерування, свердління, розточування, підрізування торців і нарізування різьблення мітчиком в автоматичному режимі. Розмір робочого столу верстата становить 700x320 мм. Стандартна швидкість шпинделя - 10000 об / хв (швидкість шпинделя може бути і 8000 об / хв). Лінійними напрямними кочення оснащуються осі X, Y, Z і швидкість переміщення по осях може становити до 30 м / хв. (При виборі сервопривода 4 / 4000i швидкість може зрости до 36 м / хв). Якщо висуваються особливі вимоги до точності, верстат може бути обладнаний замкнутою система управління з вимірювальною лінійкою високої точності. Більш того, верстат може бути оснащений делильно-поворотним столом, керованим ЧПУ, що додає можливості використання четвертої осі. За допомогою системи ЧПУ і приводу поворотна вісь може індексуватися під будь-яким кутом. На столі можуть встановлюватися деталі складної форми або складальні одиниці. За допомогою відповідної задньої бабки можуть оброблятися вали, диски та інші деталі. Верстат може обробляти отвори, пази, або особливі безперервні вигнуті поверхні з рівними або нерівними інтервалами, причому, дані деталі можуть оброблятися з високим ступенем точності. У верстаті використовується поворотний магазин інструментів барабанного типу без маніпулятора, ємність магазину складає 12 інструментів, час зміни інструменту становить 3.5 секунд. Даний верстат відрізняється високою надійністю, точністю і жорсткістю.

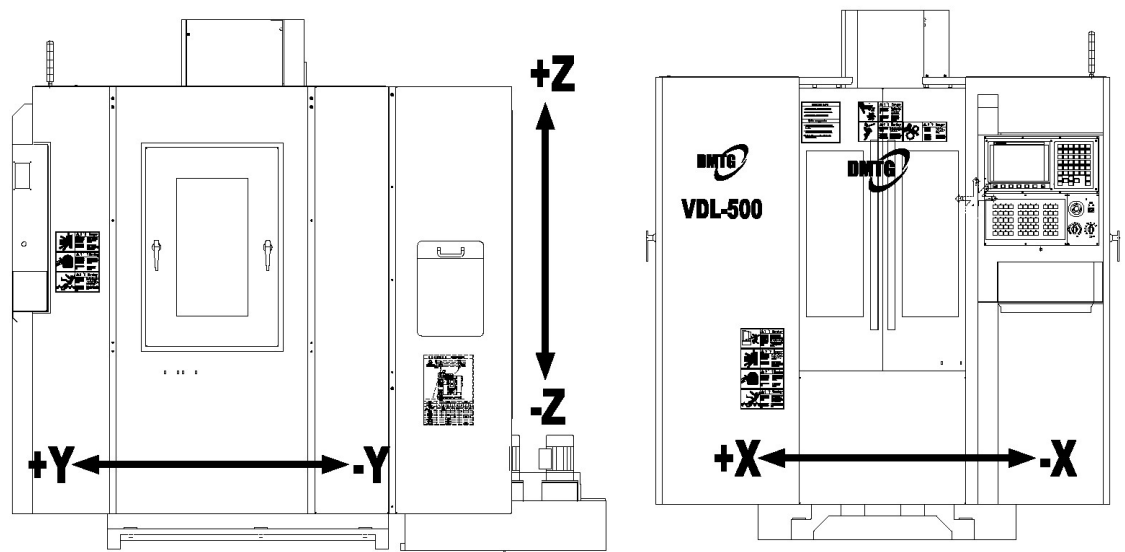


Рис.1.1 Зовнішній вигляд вертикального обробного центру.

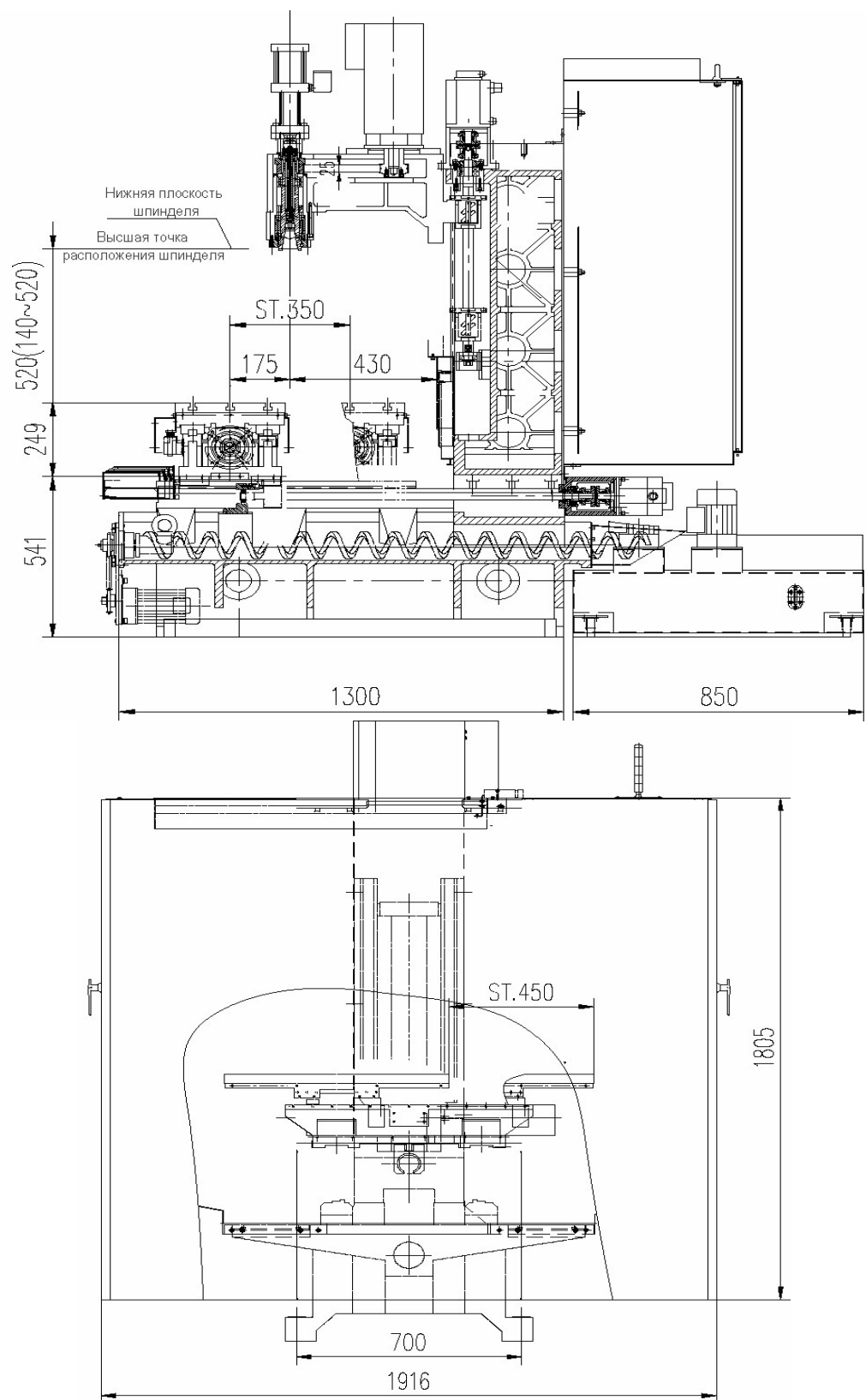


Рис. 1.2 Загальний вигляд верстата



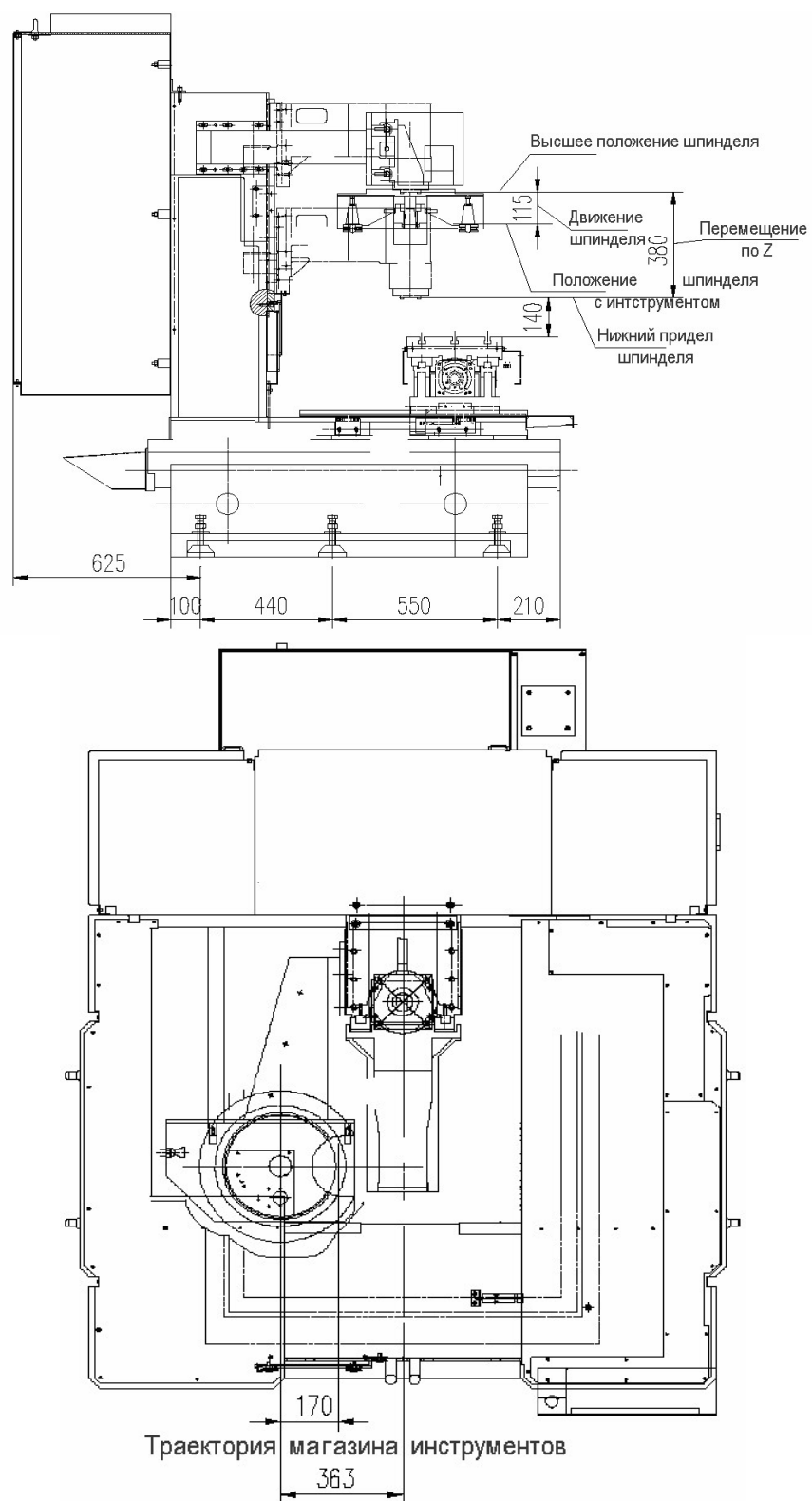


Рис. 1.3 Габариты верстата VDL-500

### 1.1 Загальні робочі характеристики верстату

1. Шпиндель;
2. Шпиндельна бабка;
3. Огорожа кабінетного типу;
4. Робочий стіл;
5. Сервопривод по осі X;
6. Захисні кожухи напрямних по осі Y;
7. Шнек для видалення стружки;
8. Станина;
9. Сервопривод осі Z;
10. Пристрій зміни інструменту магазинного типу;
11. Електрошкаф;
12. Пристрій поперечних санчат;
13. Захисні кожухи напрямних осі X;
14. Захисні кожухи напрямних осі Z;
15. Колона;
16. Бак під МОР;
17. Сервопривод осі Y;
18. Пульт управління.

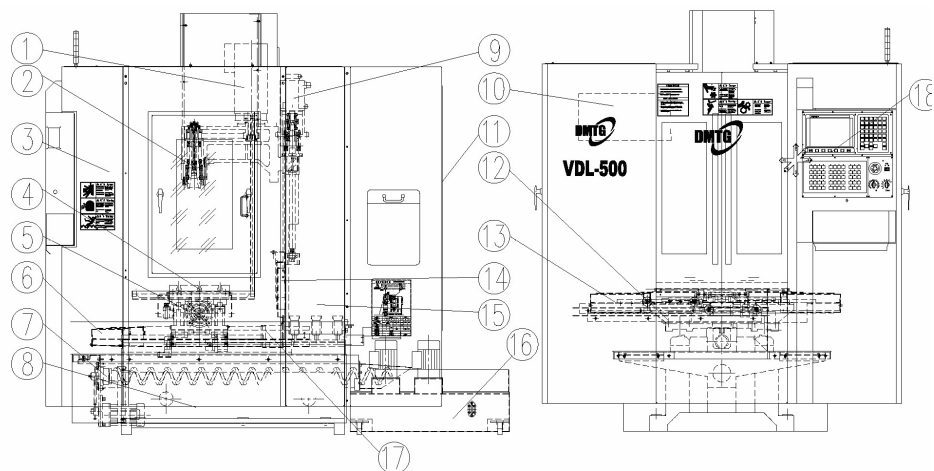


Рис. 1.1.1

Тип	VDL-500
Переміщення	Математична система
Вісь X (макс.)	450 мм
Вісь Y (макс.)	350 мм
Вісь Z (макс.)	380 мм
Відстань від торця шпинделя	140 520 мм
Відстань від осі шпинделя до	430 мм

Т-образні пази (Кількість х		5 x 18 x 100 мм
Макс. навантаження на стіл		150 кг
Розміри стола		700 x 320 мм
Шпиндель		
Потужність	3/10000i (стандартний)	3.7/5.5 кВт (FANUC 10 000 об/хв)
	6/10000i (o)	5.5/7.5 кВт (FANUC 10 000)
	1PH7 101(o)	3.7/4.9 кВт (SIEMENS 9 000)
	GM7103-	5.5/7.5 кВт (Huazhong
	ZJY132-3/7 (o)	3.7/5.5 кВт (GSK 10000 об/хв)
Макс. вращающий момент	3/10000i	23.5Нм/35Нм (FANUC 10000)
	6/10000i (o)	26.3Нм/39.4Нм (FANUC
	1PH7 101(o)	23.6 Нм (SIEMENS 9000)
	1PH7 101(o)	35 Нм (Huazhong CNC9000)
	1PH7 101(o)	14/24 Нм

Конус	ISO 40
Макс. швидкість обертання	10 000 об/хв (FANUC) (8000 –
Масило підшипника	Консистентне смастило
Охолодження	Бак СОЖ
Додаткова коробка передач	Не поставляється
Система головного приводу	Наводиться в дію
Двигун вісей	
Макс. потужність по осі	1.4/1.4/1.6 КВт (стандарт)
Макс. швидкість подачі по	30/30/30 м/хв
Робоча швидкість подачі по	1 10000 мм/хв
Пристрій зміни інструменту	
кількість інструментів	12 (барабанного типу);
Тип інструмента /	BT 40 (JT40 – о)
Тип інструментальної	P40T-1
Макс. вага інструменту	6 кг
Макс. діаметр інструмента (при відсутності	80 (150) мм;
Тип пристрою зміни	барабанного типу
Точність (одна вісь)	
Позиціонування	0.016
Повторюваність	0.006
Необхідний тиск повітря	0.6 МПа
Потужність, споживана від мережі	25 КВА

Вага верстата	2200 кг
Габаритні розміри	2570 x 1920 x 2200 мм

Стандартні пристосування

Таблиця 1.1.2

	Опис
	Інструментальний магазин барабанного типу на 12 інструментів
	Шнековий транспортер для видалення стружки
	Захист кабінетного типу
	Жорстке нарізування різблення мітчиком
	Фундаментні болти і клини (віброопори)
	Комплект інструментів для обслуговування верстата
	Інтерфейс RS-232 і функція DNC
	Місцеве освітлення
	Пістолет для сдува стружки
	Система захисту шпинделя від вологи і пилу
	Лампа аварійної сигналізації
	Теплообмінник електрошафи
3	Автоматична система вимикання електроживлення M30

Додаткові пристосування Таблиця 1.1.3

	Описание
	Високошвидкісний шпиндель (10 000 або 12 000 об / хв)
	Інструментальний магазин барабанного типу на 16 інструментів
	Пристрій контролю стану інструменту
	4-я контрольована вісь - поворотний стіл з ЧПУ

	Пристрій контролю стану інструменту	
	Хвостовик інструменту JT40	
	Контроль закриття дверей	
	Хвостовик управління BT40-45 або P40T-1	
	Тестова оправлення шпинделя	Хвостовик управління BT40-45
		Хвостовик управління
0	Центруюче кільце маніпулятора інструментального магазину	Хвостовик оправки BT40-45 □
		Ковпачок пристрою нарізування
		Позиціонує управління VDL600A-
		Вимірювальний інструмент VDL600A- A69707
1	Конус на втулка шпинделя	Хвостовик оправки BT40-45 □
		Конусна втулка шпинделя VDL600A- A69707
		Маніпулятор (рукоятка) VDL600A- A69710

Двигун шпинделя

Таблиця 1.1.4

Двигун	Крутний статичний момент	Номіна льна швидкість	Вихідна потужність
FANUC :0i α3/10000i	23.5/35 Нм	10000 об/хв	3.7/5.5 кВт

FANUC:0i β 6/10000i	26.3/39.4 Нм	10000 об/хв	5.5/7.5 кВт
SIEMENS: 1PH7 101	23.6 Нм	9000 об/хв	3.7/4.9 кВт
Huazhong CNC:GM7103- 4SB61	35 Нм	9000 об/хв	5.5/7.5 кВт
GSK:ZJY13 2-3.7	14/24 Нм	10000 об/хв	3.7/5.5 кВт

(5) Магазин інструментів (Shanghai Huazi electromechanical)  
[см.руководство по експлуатації]

(А) Магазин барабанного типу: Двигун: M9160GKM 4В-ТВ (3-фазний:  
380В / 220В; 60Гц / 50Гц)

Редуктор: M9G30В

(В) Інструментальний магазин манипуляторного типу: Двигун кутовий  
індексації: 5IK90GU-УМ (380; 50 Гц).

Характеристики електроживлення

Таблиця 1.1.4

Напруга	3-фазний, 380В АС
Частота	50 Гц
Діапазон зміни напруги	Макс: □10% або Мин: □15%
Потужність	15 кВа
Силовий провід	8мм <sup>2</sup> або більше
Провід заземлення	8мм <sup>2</sup> або більше

### 1.1.1 Підшипники шпинделя

Високоточні і високошвидкісні радіально наполегливі шарикопідшипники (7012С ТУН DBD L Р4) і (7012С ТУН DB L Р4) використовуються відповідно як переднього підшипника шпинделя і заднього підшипника шпинделя, і несуть як осьовий, так і радіальне зусилля. Мастило підшипників здійснюється за допомогою мастила для високошвидкісних підшипників (NBU15, біла), яку можна використовувати протягом 10000 годин. (Дивіться рис. 1.1.2 (а))

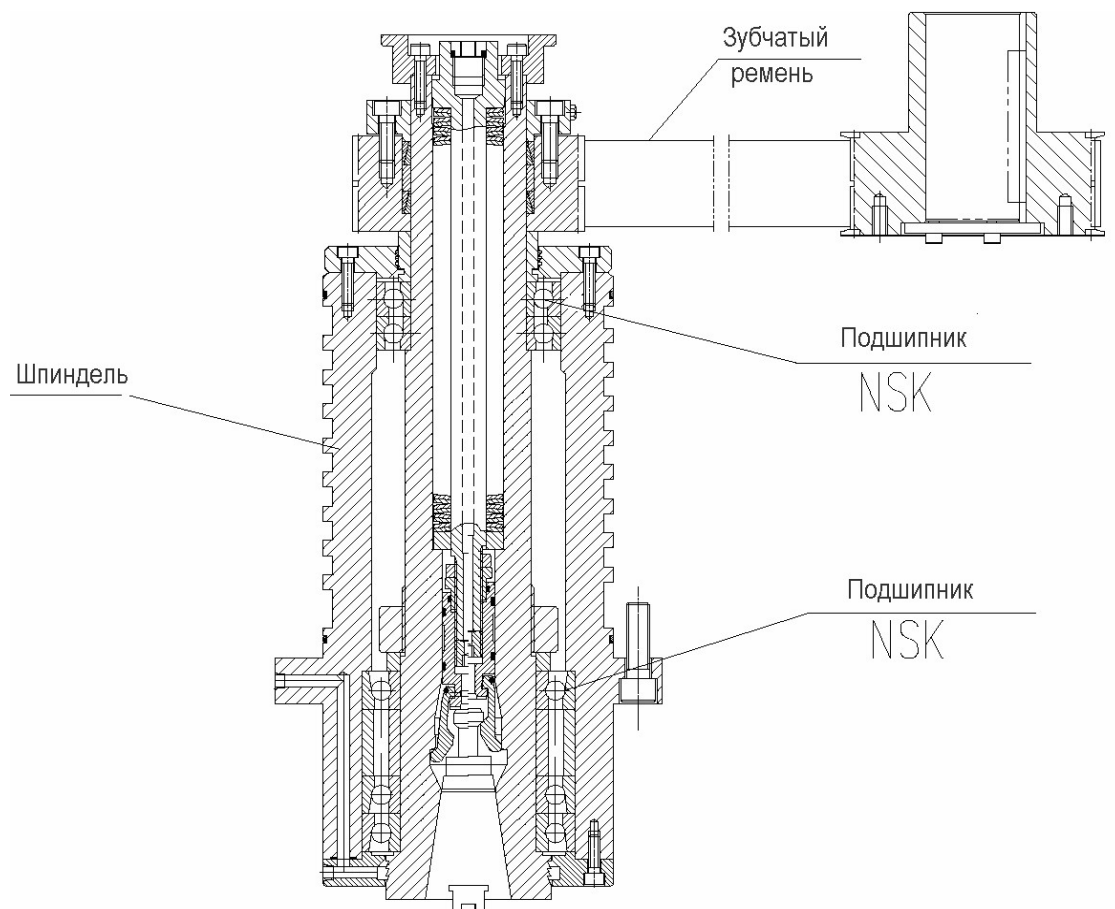


Рис. 1.1.2 (а) Шпиндель

### 1.1.2. Шпиндель



Отвір конуса шпинделя - №40 (конус 7:24), до оправці інструменту приєднується хвостовик інструмента - BT40-45 °, який використовується для затиску інструменту за допомогою набору тарілчастих пружин. Інструмент може бути розціпленого пневмо - гідравлічним циліндром.

Під час зміни інструменту відбувається обдув конуса шпинделя сухим повітрям для очищення отвору конуса і хвостовика інструменту перед установкою нового обраного інструменту в отвір конуса шпинделя.

Додатково, для збільшення швидкості обертання може бути встановлений високошвидкісний шпиндель. Шпиндель оснащений високошвидкісними точними радіально-наполегливими підшипниками, має невелику масу, низький рівень розширення, високу жорсткість і, відповідно, продуктивність, що дозволяє в значній мірі зменшити відцентрову силу і теплове розширення, збільшуючи швидкісні характеристики шпинделя до 10000 об / хв. Використовується потужне 4-х сегментний затискний пристрій для захоплення інструменту, що забезпечує потужний затиск через збільшення площі дотику, воно в той же самий час, дозволяє зменшити знос хвостовика інструменту. Шпиндель приводиться в дію за допомогою ремня з високим обертальним моментом, тому не відбувається прослизання і знижується рівень шуму.

Шпиндель оснащений RD -улаштування динамічного балансування, щоб виробляти динамічне балансування шпинделя для видалення резонансу під час роботи шпинделя на високій швидкості і гарантувати оптимальну точність обробки.

Вихідна потужність двигуна шпинделя і характеристики крутного моменту:

Графік вихідної потужності шпинделя графік крутного моменту

График выходной мощности шпинделя

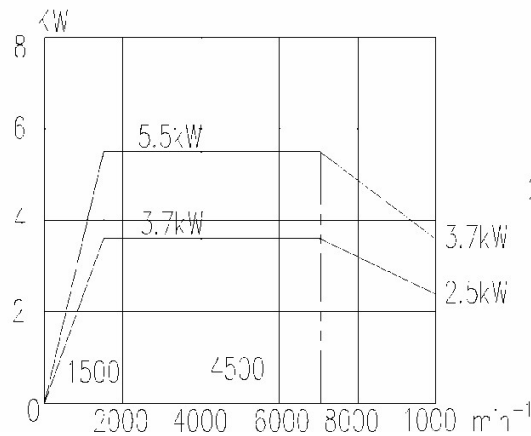


График крутящего момента шпинделя

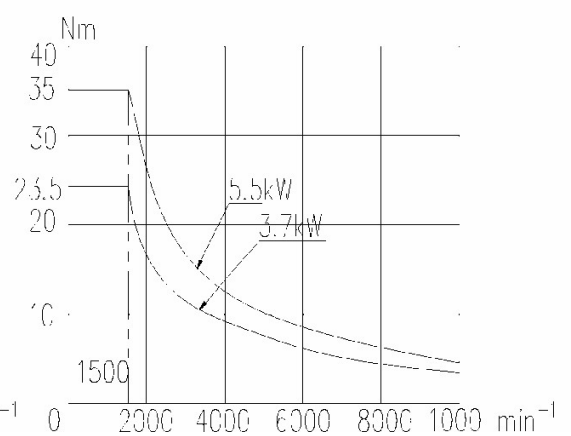


Рис.1.1.3 Робочі характеристики двигуна шпинделя FANUC 3 / 10000i

График выходной мощности шпинделя

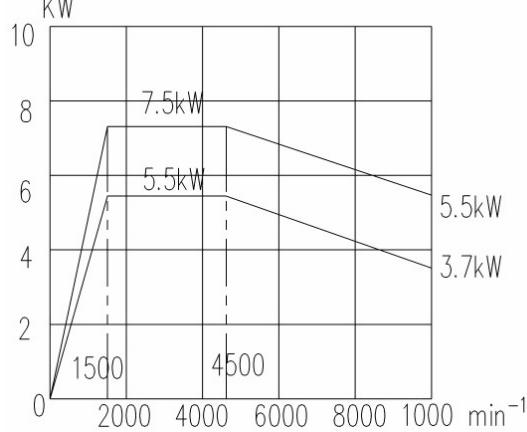


График крутящего момента шпинделя

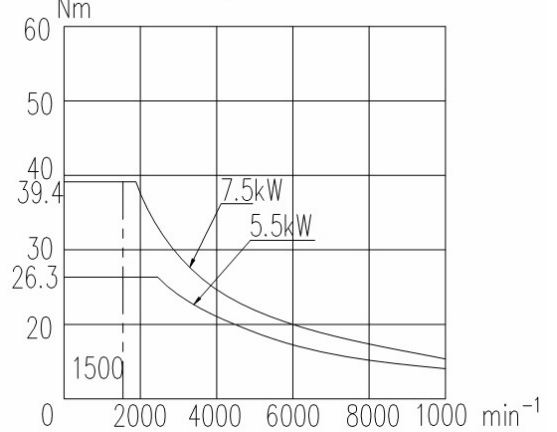


Рис.1.1.4 Робочі характеристики двигуна шпинделя FANUC 6 / 10000i

Високошвидкісний шпиндель, який використовується в складі металорізального верстата, повинен забезпечувати ряд технічних вимог, до яких відносяться:

1. Висока максимальна потужність і потужність постійного дії
2. Максимальна радіальна і осьова жорсткість
3. Максимальна швидкість обертання
4. Відповідність вимогам високошвидкісної обробки (ВШО) система кріплення інструменту, часто з можливістю автоматичної зміни інструменту

Для кожного конкретного практичного застосування повинен бути проведений вибір між шпинделем з ремінною передачею і моторшпинделем.

Нижче буде показано, що ці вимоги важко поєднати в одному дизайні. Деякі вимоги суперечать один одному, так що в ряді випадків необхідно йти на компроміси з тим, щоб сконструювати найбільш задовольняючий заданим технічним характеристикам шпиндель.

Верстат зі свого боку висуває вимоги до шпинделя. Розміри робочого простору, фактор вартості, складність і вимоги ринку також визначають вибір шпинделя. Вартість грає визначальну роль. Ніхто не буде вбудовувати складний багатофункціональний шпиндель в простий верстат, де вартість шпинделя досягає вартості самого верстату. Такий шпиндель підходить для складного верстата з високими вимогами по точності і продуктивності.

Отже, розглянемо основні компоненти високошвидкісних шпинделів, їх надійність, вартість та технічне обслуговування.

## **2. ПРОБЛЕМИ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ**

Перспективним шляхом зниження обсягу доводочних робіт, підвищення продуктивності, точності і собівартості виготовлення деталей ЛА є високошвидкісна обробка. У зв'язку з цим високі вимоги по точності і параметричній надійності пред'являються до шпиндельним вузлів металорізальних верстатів, які, як показують дослідження, до 80% визначають точність обробки виробів. Оскільки рух формоутворення здійснюється шпинделем і шпиндельними підшипниками, то саме вони вносять вирішальний внесок у вихідні характеристики верстатів.

Робота шпиндельних вузлів (ШВ) на опорах кочення супроводжується нестабільною траєкторією руху шпинделя, тепловими зсувами підшипникових вузлів, періодичною зміною жорсткості підшипників, що пов'язано зі зміною кута повороту сепаратора з комплектом тіл кочення і т.д. Найбільш ефективними для них стало змазування об'ємним мікродозування оптимальними кількостями мастильного матеріалу. Застосування в конструкціях високошвидкісних ШВ гідростатических підшипників призводить до обмеження частоти обертання шпинделя (через втрати на тертя) і ускладнення конструкції опорного вузла. Шпинделі на електромагнітних опорах поки не знайшли широкого застосування в ШВ внаслідок складності і високої вартості шпинделів і електронних систем управління. Зазначених недоліків позбавлені ШВ з підшипниками на газовій мастилі. Разом з тим ШВ на газостатичних опорах мають порівняно невисоку силу різання, що обмежує область їх застосування. Дослідження, виконані в Комсомольському-на-Амурі ГТУ, показали, що різні способи організації наддуву газу в зазор газостатичних опор не ведуть до істотного зростання вихідних характеристик ШВ.

Ще одна з можливих проблем - це розбалансування вала, найчастіше, внаслідок некваліфікованого втручання (наприклад, неправильної розбиранні із застосуванням кувалд і зубил). Для балансування вала використовуються балансувальні стенди з необхідним обладнанням (осцилограф).

Причинами виходу з ладу високошвидкісних шпинделів можуть бути різного роду ушкодження конічної поверхні патрона шпинделя через недбалої установки інструменту або, що стосується високошвидкісних шпинделів з автоматичною зміною інструменту, то вихід з ладу механізму автоматичної зміни, як правило, внаслідок жорсткого контакту з вузлами верстата і пристосуваннями, або початковий дефект і подальший розвиток втомних тріщин.

Крім цього, як окремий випадок, може виникати: пробій обмотки статора, згоряння статора (здебільшого, через неякісне частотного перетворювача), розрив пружини загарбного механізму (у шпинделів з автосменой), поломка самого затискного механізму, вихід з ладу пневматичних вузлів .

### 3. ВИБІР ЕЛЕКТРОШПИНДЕЛЯ.ОПИС ПРОЦЕСУ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

#### 3.1 Схема обробки деталі з використанням електрошпинделя в обраному верстаті.

Попереднє фрезерування відкритих площин шириною ви-виконується за один прохід. Напрямок руху вибирається так, щоб деталь притискалися до опор (рисунок 6.1).

Обробка контурної площині з шириною виробляє за схемою вказаний на малюнку 3.1.1.

Для фрезерування площин, що складається з окремої віддаленої один від одного ділянок, використовується схема вказаний на малюнку 3 дозволяє здійснювати переміщення від ділянки до ділянки на швидкому ході.

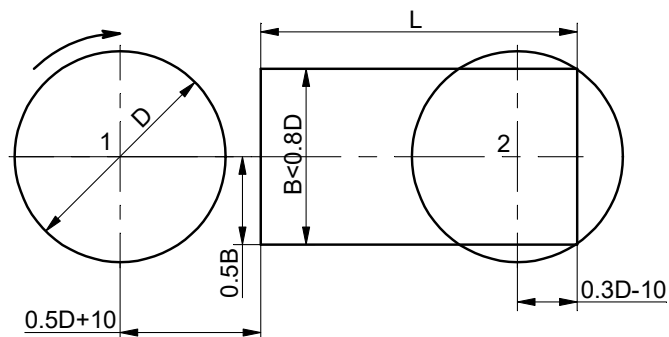


Рис. 3.1.1.Схема переміщення інструменту при попередній обробці площин

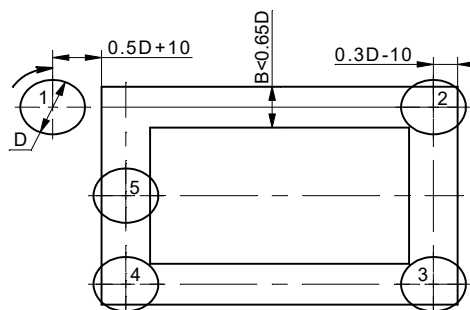


Рис.3.1.2. Схема переміщення інструменту при попередній обробці

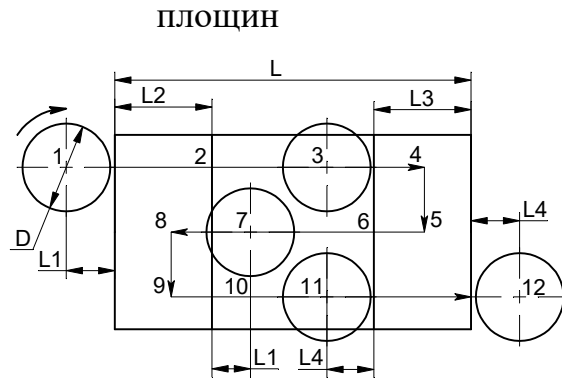


Рис. 3.1.3. Схема переміщення інструменту при попередній обробці відкриті площині

Схема, представлена на малюнку 4 застосовується при обробці площин кінцевий фрезою.

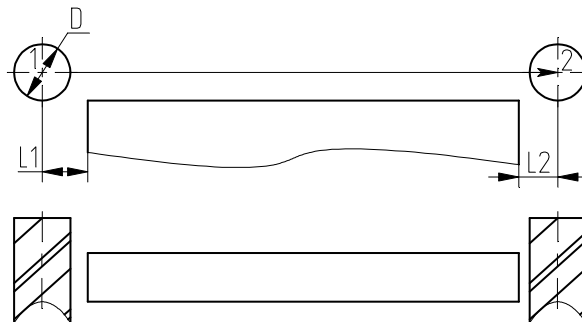
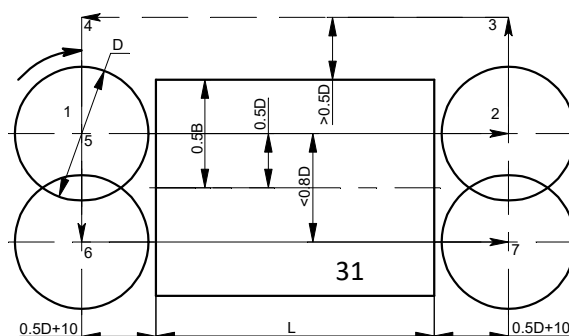


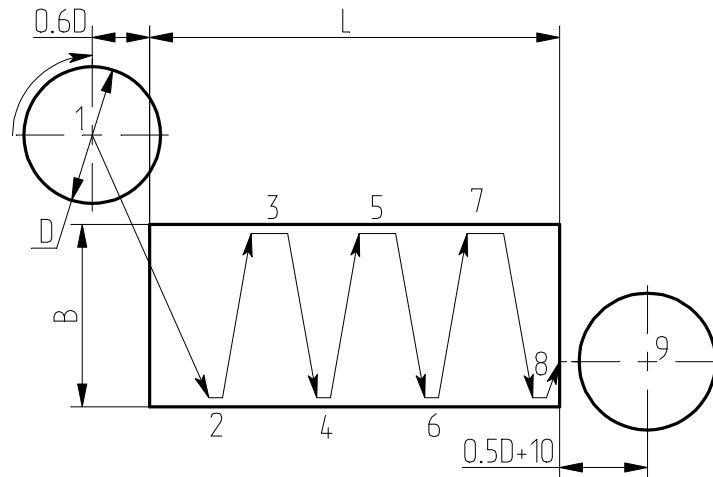
Рис. 3.1.4.Обработка площині кінцева фреза

Чистова обробка площин може виконуватися по двухпрохідній схемі

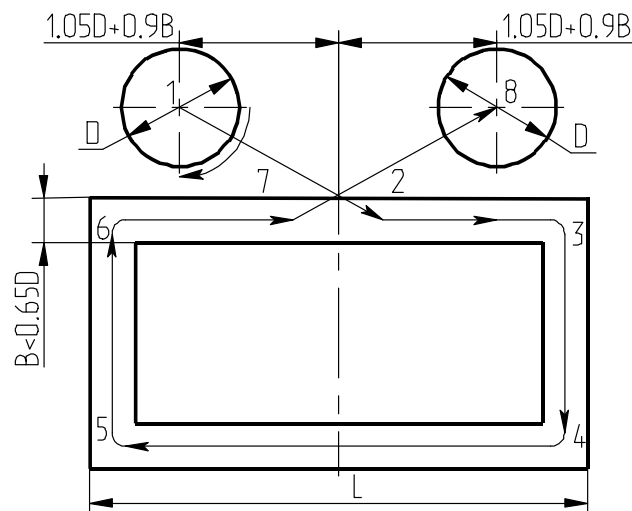
(Рисунок 3.1.5, а) або переміщення фрези зигзаг (рисунок 3.1.5, б). Для чистової оброблення контурних поверхонь доцільно застосовувати схеми, зазначені на рисунку 3.1.5, ст.



а)



б)



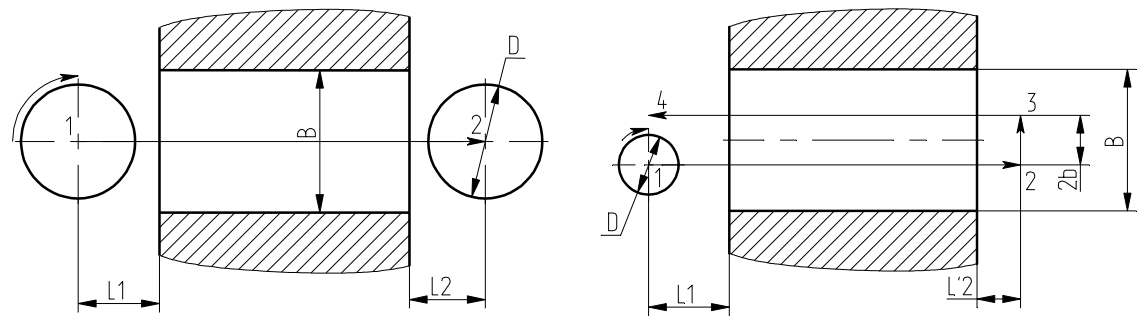
в)

Рис. 3.1.5.Схема переміщення інструменту при чистовій обробки відкритої площині торцевих зубів фрези

Обробка пази кінцева, дисковий або шпонкова фреза виконується за один-три прохід. Неточні пази з шириною обробляється за один прохід (3.1.5 малюнок, а), а з шириною - за два проходи (рисунок 3.1.5, б, в). Якщо ширина паза складає, то спочатку обробляється центральна частина паза, а потім - його

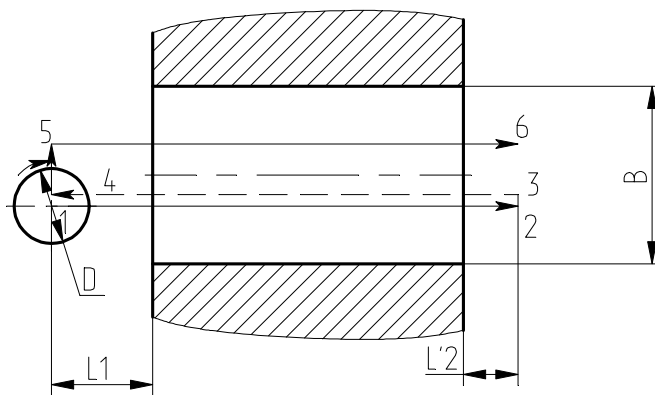


бічні сторони. Обробка пазів з шириною здійснюється так, що бічні сторони обробляються кінцевий фрезою за два проходи, а середня частина - торцевої фрезою за схемою на 3.1.6 Рис. а.



а)

б)



в)

Рис. 3.1.6.Схема переміщення фрези при обробці пази:

а - за один прохід;

б - за два проходи з робочою подачею в обидві сторони;

в - за два проходи з робочою подачею в одну сторону;

$$L_1 = L_2 = 0.5D + 10;$$

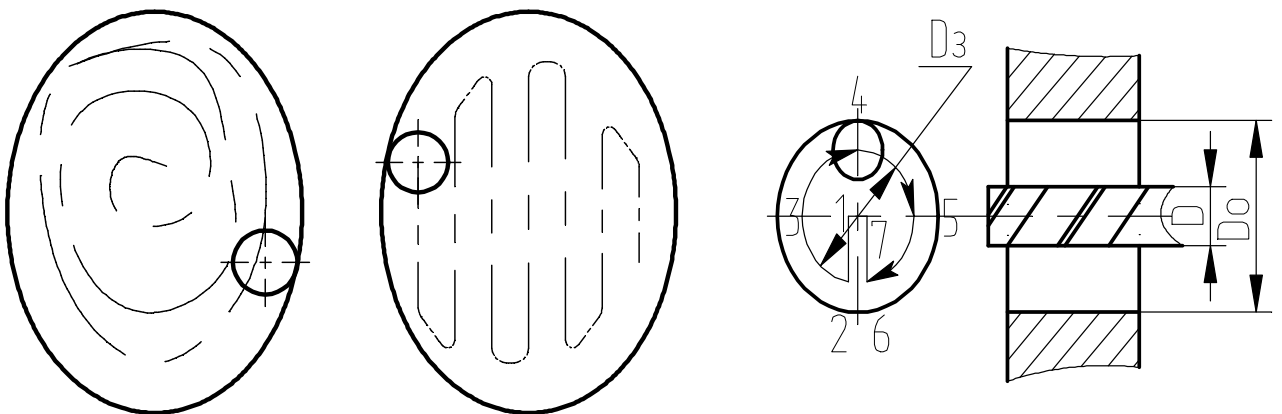
$$L'_2 = 10\text{ мм};$$

$$b = (B + D) / 2;$$

На малюнку 6 наведено схеми переміщень інструменту при фрезеруванні отвір, вікон, канавки, і інший внутрішні контури. При чорнова обробка кишень фреза може рухатися по "Спіралі" (рисунок 6.1.7 а) або "" рядок (3.1.7 Малюнок б).

Чорнове фрезерування отворів кінцевий фрезою виконується з урізуванням по радіусу (малюнок 3.1.7, в), а напівчистове - з урізуванням спочатку по радіусу, а потім по дузі кола (рисунок 3.1.7 г). При обробці виїмок і кишень в тих випадках, коли попереднє свердління отвори для виведення фрези недоцільно, краща схема, наведена на рисунку 3.1.7 д. Кільцеві канавки в отворах фрезеруються дискової тристоронньої або однозубий фрезою за схемою 3.1.7 е. Якщо ширина канавки перевищує ширину фрези, виконується кілька проходів.

Фрезерування внутрішніх контури (вікна) по доцільно виконувати схему на малюнку 3.1.7, ж, а зовнішні контури - за схемою на малюнок 3.1.7 з. При цьому чорнове фрезерування рекомендується виконувати з урізуванням по радіусу, а напівчистове - по дотичній



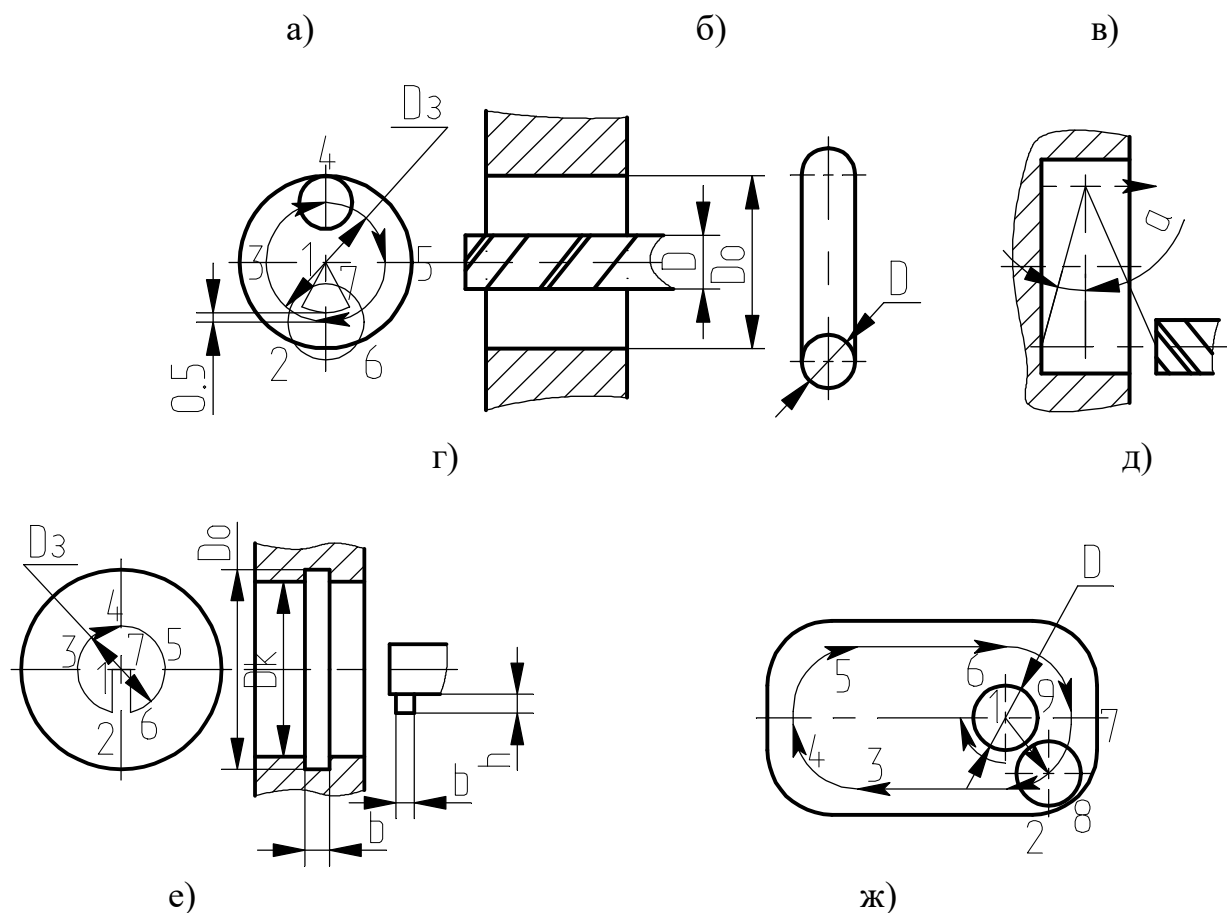


Рис.3.1.7.Схема переміщення фрези при обробці криволінійні контури:

а - чорнове розфрезерування по "спіралі"; б - те ж, по "рядку"; в - те ж, з урізуванням по радіусу; г - напівчистове розфрезерування з урізуванням по радіусу і дузі; д - врізання фреза "зигзаг"; е - обробка кільцеві канавки; ж - під чистове обробка внутрішніх контурів

Мотор-шпиндель повинен, бути вібростійким, відповідати необхідної швидкості, володіти якістю довговічності і мати необхідну систему мастила.

Існує кілька способів конструкції мотор-шпинделя при різних варіантах виконання:

- мотор-шпиндель на опорах кочення, ковзання;
- мотор-шпиндель на опорах з активним магнітом.
- Існують різні способи змащування підшипників:
- Пластичний матеріал;

- Рідкий матеріал;
- Масляний туман.

При проектуванні буде використана схема електрошпинделя на опорах кочення.

Гідність даного електрошпинделя є здатність роботи на великих швидкостях 30000 об / хв, мала потужність, надійність, простота виконання, довговічність. Масляна мастило дозволяє збільшити термін служби.

Недоліки: нестабільна траєкторія руху шпинделя, періодична зміна жорсткості підшипників. Другий спосіб виконання є, використання електрошпинделя за допомогою магнітної опори.

Недолік даний спосіб виконання є складність: дана концепція є дорогою і недоцільною у використанні.



Рис. 3.1.8. Датчик кута повороту фірми HEIDENHAIN

Компанія HEIDENHAIN (DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH) розробляє і виробляє датчики вимірювання лінійних і кутових переміщень, датчики обертання, пристрої цифрової індикації та системи числового програмного керування для задач позиціонування, що вимагають високої точності. Продукція компанії HEIDENHAIN застосовується, перш за все, в високоточних верстатах і пристроях з виробництва і подальшої обробки електронних компонентів.

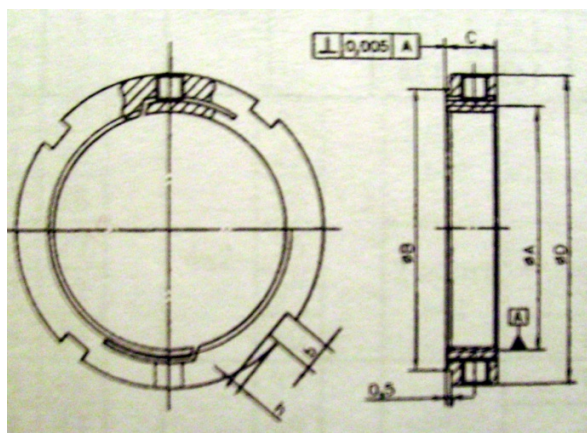


Рис.3.1.10 ГАЙКА SFERO типу ЖРД

Регулювання величина натягу в опорах здійснює гайку фірма SFERO типу ЖРД. Для регулювання підшипників гайка повинна надійно фіксуватися після досягнення необхідного натягу в підшипниках, тобто в будь-якому кутовому положенні або через кожні 20 ... 30°.

## 4. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

### 4.1. Типи електродвигунів

Електродвигуни для шпиндельних вузлів, можна розділити на два основних типа:

- для встановлення через пасову передачу;
- інтегрований у шпиндельний вузол.

Розглянемо кожен з них, та відокремимо їх позитивні та негативні відмінності.

#### 4.1.1. З пасовою передачею

Одним з двох варіантів передачі крутного моменту з електродвигуна на вал шпинделя, є пасова передача. Вона значно спрощує конструкцію, але є не такою надійною, зазвичай швидкості таких шпинделів не перевищують 10000 об / хв.



Рис. 4.1.1а Приклад шпинделя з ременевим приводом



Рис. 4.1.1б Приклад шпинделя з пасовою передачею у зборі

Оскільки швидкість в таких шпиндельних вузлах обмежена, вони не підходять до завдань нашого проекту.

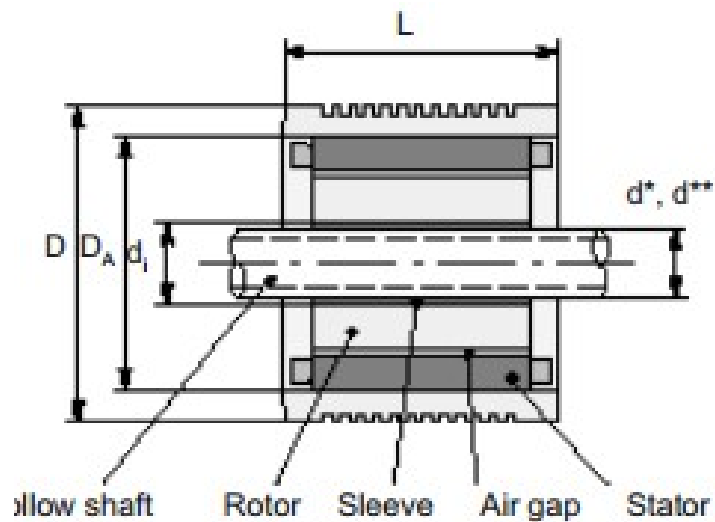
#### **4.1.2. Інтегрований у корпус шпиндельного вузла електродвигун**

В якості інтегрованих електродвигунів електршпинделів застосовують керовані асинхронні та синхронні спеціальні двигуни, чий розмір адаптований під гільзову конструкцію шпинделя. В разі передачі обертання пасовою передачею використовують також асинхронні та синхронні керовані двигун, зокрема серводвигуни з відповідними системами керування зворотніми зв'язками та датчиками переміщення і швидкості, що можуть бути вбудовані безпосередньо в двигун.

Слід згадати, що в разі модернізації та осучаснення верстатів з ЧПК одним з можливих варіантів є застосування електродвигунів які вбудовуються в конструкцію ШВ. В цьому разі необхідно враховувати певні обмеження, в першу чергу відстань між опорами та можливий діаметр насадної конструкції.

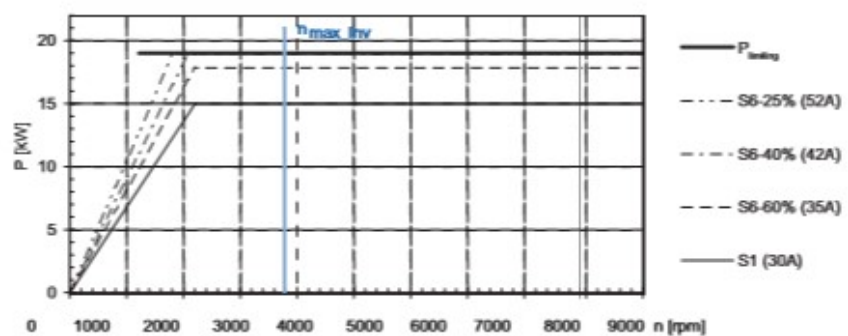
Номенклатура подібних двигунів не дуже широка. Наприклад фірма Siemens

випускає двигуни типу 1FE які вибирають за даними попередніх розрахунків необхідної потужності і моменту. Для нашого верстату міг би бути предатним двигун 1FE1084-6WR-1 з наступною технічних характеристики:  $N_{ном} = 27,2 \text{ кВт}$  ,  $I_{я} = 110 \text{ А}$  ,  $n_{ном} = 2000 \text{ об}^{-1}$  ,  $n_{max} = 9000 \text{ об}^{-1}$



Motor type	L	D	D <sub>A</sub>	d <sub>i</sub> -A□.	d* -B□.	d** -C□.
1FE1084-6W□□□-1B□□	295	190	170	93	67	74

Рис. 4.1.2а. Основні розміри мотор-



шпинделя



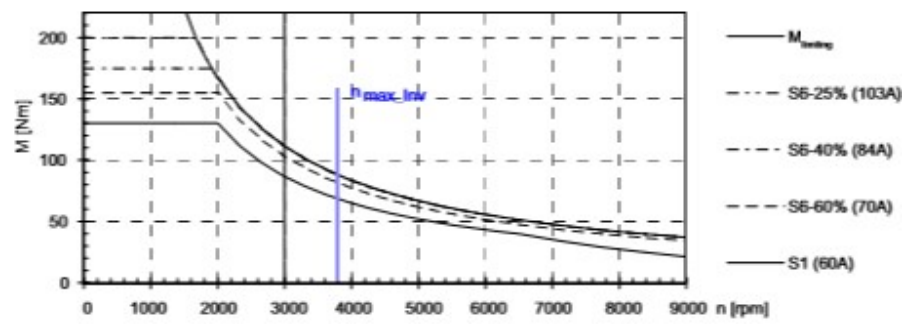


Рис. 4.1.2б- Діаграма числа обертів / потужність і число обертів / год для Siemens 1FE1084-6WR-1

## 5. ПРОЕКТУВАННЯ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА

### 5.1. Оцінка, параметри, бистрохідність шпиндельного вузла

Шпиндельні вузли з двома радіально-упорними підшипниками в передній опорі. Ця опора компонується за схемою тандем-Х і сприймає осьову навантаження в трьох напрямку. Шпиндельні вузли не розрізняються конструкцією задньої опори.

У задній опорі встановленарадіально-упорні підшипники аналогічні тим, що і в передній опорі, тільки з меншим діаметром, вона також компонується за схемою дуплекс-Х, але навантаження сприймається в протилежній стороні.

Параметр швидкохідності для таких шпинделів  $K = (4..6) 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ .



Рис.5.1 - Схема компонування шпиндельного вузла.

Для збільшення параметра швидкохідності встановлює підшипники з керамічними кульками фірми FAG. Той самий параметр бистроходность збільшується в 2 рази.

$K = (8..12) 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ . Вибираєм  $K = 11 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$

$$D_{\max} = \frac{K_1}{n_{\max}} = \frac{11 \cdot 10^5}{8000} = 137,5 \text{ мм} \quad (\text{Приймаєм } 125 \text{ мм})$$

## 5.2.Формування переднього кінця шпинделя відповідно до діючих стандартів

Передній кінець шпинделя служить для базування і закріплення різального ін-струмента, оброблюваної деталі і пристосування. Передні кінці виконуються за державними стандартами. Кінці шпинделів багатоцільових свердлильно-фрезерно розточувальних верстатів (з ЧПУ і системою автоматичної зміни інструментів) повинен мати конструкцію, яка дозволяє автоматично закріплювати інструменти і оправлення з хвостовиком виконання А по ГОСТ 51547-2000 "Хвостовики інструментів порожнисті конічні типу HSK."

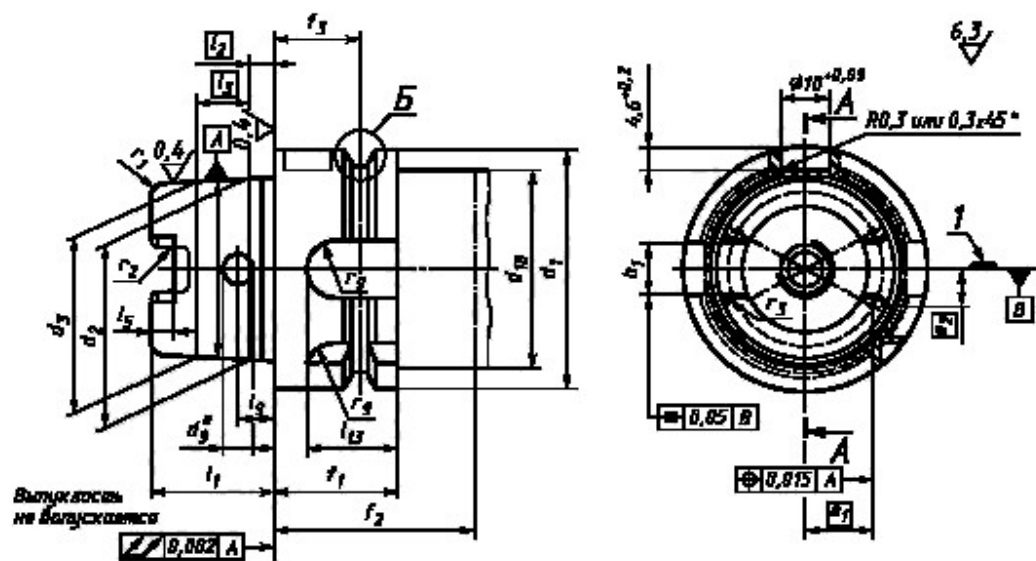


Рис.5.2- Хвостовики інструментів порожнисті конічні типу HSK

Виходячи з максимальної величини вставляються інструментів (фреза-100 мм, свердло-20 мм) приймає умовного розмір кінця шпинделя - HSK 80.

Таблиця 5.2 - Основні розміри хвостовика HSK

Основные размеры	$b_1$ $\pm 0,04$	$b_2$ H10	$b_3$ H10	$d_1$ h10	$d_2$		$d_3$		$d_4$ H10	$d_5$ H11	$d_6$	$d_7$ , не более	$d_8$ -0,1	$d_9$	$d_{10}$ , не более	$d_{11}$ -0,1
					Номен.	Пред. откл.	Номен.	Пред. откл.								
80	16,04	18	20	80	60	+0,013 +0,008	58,10	+0,008 +0,003	42	50,0	46	10,2	42,5	8,5	67	70,0

№80

### 5.3. Вибір матеріалу для шпинделя і технології термічної обробки

Матеріал для шпинделя вибирає виходячи з вимог забезпечити необхідну твердість і зносостійкість його шийки і базують поверхнями, а також запобігти малі деформації шпинделя з плином часу (викривлення).

Так як проєктований шпиндель фрезерно-свердлильно-розточний, то для його шпинделя потрібна підвищена зносостійкість поверхонь, яка використовується для центрування пристосувань, тому застосує попередньо матеріал 18ХЕТ з цементациєю і загартуванням до твердості 56 ... 60 HRCe.

Вимоги до твердості відповідальні поверхонь шпинделя і товщина зміцненого шару залежить від типу опора, точність верстата і функція отвори в передньому кінці шпинделя. Найбільш висока зносостійкість, а значить, і твердість повинні бути у опорних шийок шпинделя, що встановлюється в підшипниках передньої опори і в іншого більш відповідальні поверхонь (див. Таблиця 5).

Таблиця 5.3 - Вимоги до твердості зміцнених поверхонь і глибина зміцнення шпинделя

Відповідальні ділянки шпинделя,	Необхідна твердістьHRC,не меньше	Необхідна товщина зміцнювального шару,мм, не меньше
Піддаються зміцненню	50	0.3

Поверхня опорних шийок під підшипники кочення	45	0.3
---	----	-----

#### **5.4. Обґрунтування способу змащування і розробки системи змащування. Визначення конструктивних параметрів ущільнень.**

Змазування шпиндельних опор здійснюється рідким мастильним матеріалом (масло ІПП-18), який відводить тепло від шпиндельних опор, забирає з підшипників продукти зношування і забезпечує утворення на їх робочих поверхнях в зоні контакту еластодінамічної плівки.

Необхідна витрата через опору при номінальному діаметрі отвору підшипника 50..120 мм і більше 120 мм повинен складати відповідно 1100..1500 і більше 2500 см<sup>3</sup> / хв.

Масло в передній опорі подається примусово через штуцер підведення 1 за допомогою насоса. У передній опорі через канал підведення 2 масло подається до втулки 3 і потрапляє до підшипників 4, 5. Після змазування опори шпинделя масло потрапляє в порожнину 6.

Для змазування задньої опори масло через канал підведення 7 потрапляє в підшипник 8. Далі масло подається до втулки 9 і потрапляє до другого підшипник 10. після змазування опори шпинделя масло потрапляє в порожнину 11. Частина ОЛПІ зливається, а частина проходить зигзагоподібні ущільнення 12

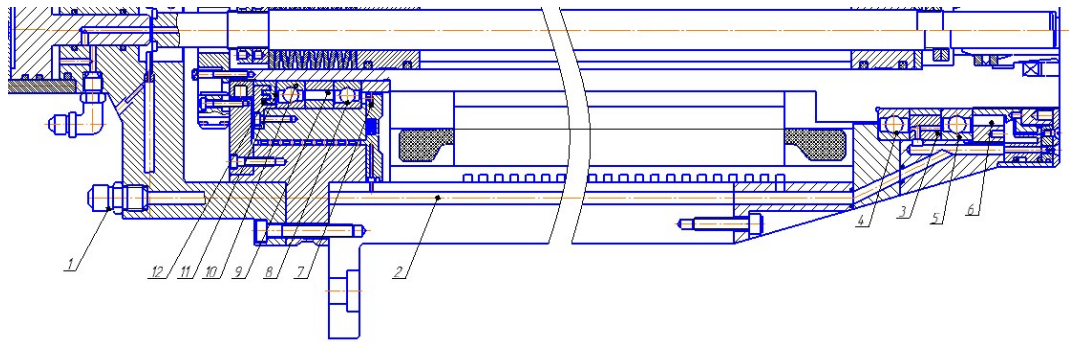


Рис.5.4.1- Система змащування опор шпинделя

Мінімально допустимий витрата мастильного матеріалу для змазування шпиндельних опор(см<sup>3</sup>/хв) визначимо за такою залежністю:

$$Q = 0,66 \cdot d_m^2 \cdot n^{0,5} \cdot i \cdot \nu^{-1} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4;$$

де  $d_m$  — середній діаметр підшипників, мм;

$n$  — частота обертання шпинделя, хв-1;

$i$  — число рядів тіл кочення;

$\nu$  — вязкість масла при робочій температурі опори, м2/с;

$k_1$  — коефіцієнт, характеризуючий тип підшипника;

$k_2$  — коефіцієнт, характеризуючий умови навантаження;

$k_3$  — коефіцієнт, характеризуючий умови виходу масла із опори;

$k_4$  — коефіцієнт, залежний від робочої температури підшипника;

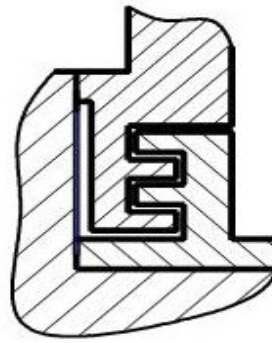
Для передньої опори:

$$Q = 0,66 \cdot 60^2 \cdot 9000^{0,5} \cdot 1 \cdot 20,5^{-1} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 11250 \text{ см}^3/\text{хв}$$

Для задньої опори:

$$Q = 0,66 \cdot 41,5^2 \cdot 9000^{0,5} \cdot 1 \cdot 20,5^{-1} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 5260 \text{ см}^3/\text{хв}$$

Прокачування через шпиндельну опору даної кількості масла не тільки дозволяє надійне змазування, а й забезпечує відведення теплоти від опори, т. е. створить режим "охладжуючу" змазування.



Малюнок 5.4.2-Зигзагоподібне лабіринтове ущільнення

Ущільнення захищають підшипники від забруднень і мастильно-охолоджуюча рідина, перешкоджає витіканню мастильного матеріалу з опор. Врахувавши вертикальне розташування шпинделя, а також високі частоти його обертання, застосує безконтактний динамічний зигзагоподібний лабіринтове ущільнення радіального типу.

## **5.5 Обґрунтування показники точність деталі, пов'язані з підшипників-ки**

Якщо підшипники кочення сполучається з деталями відносно низька точність, в процесі монтаж підшипники і регулювання зазорів або натяг про-філь дорожжікачення спотворюється, в результаті чого жорсткість і точність шпінд-ний вузол знижується. Тому відхилення розмірів і форм поверхонь дета-лей, пов'язаних з підшипниками кочення, повинні бути менше відхилень контактують з ними поверхонь підшипників. Посадки підшипників, прийняті відповідно до запропонованих рекомендацій і способами монтажу, показані на доданих кресленнях спроектованого приводу.

## 5.6. Розрахунок шпиндельного вузла базового верстата на жорсткість

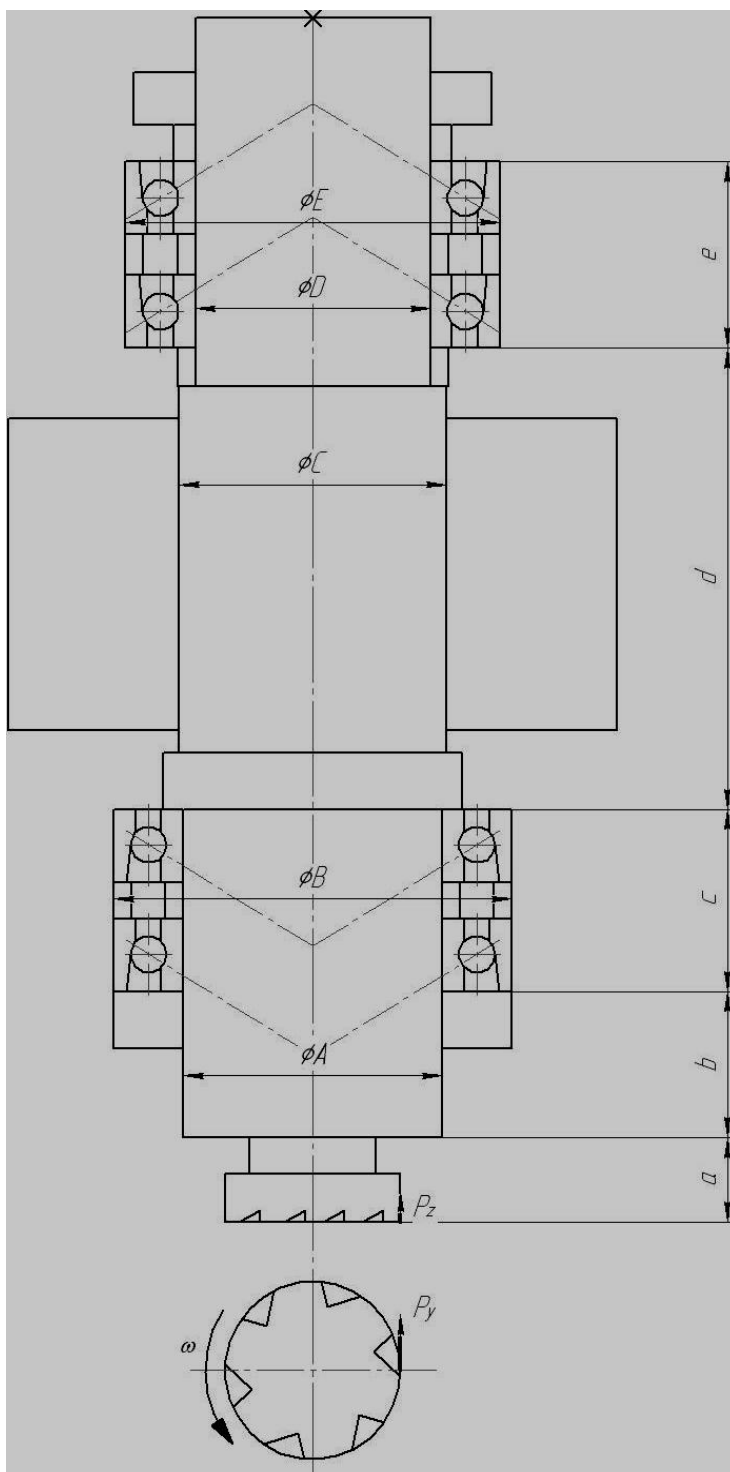


Рис.5.6.1 - Схема шпиндельного вузла

$a = 130$  мм;

$d = 329$  мм;



$$b = 68 \text{ мм};$$

$$\varnothing A = 100 \text{ мм};$$

$$c = 60 \text{ мм};$$

$$\varnothing B = 140 \text{ мм};$$

$$e = 54 \text{ мм}; \varnothing C = 74 \text{ мм};$$

$$\varnothing D = 65 \text{ мм};$$

$$\varnothing E = 100 \text{ мм};$$

Мінімальна частота обертання шпинделя визначається за формулою, об /

хв:

$$n_{min} = \frac{1000 v_{min}}{\pi D_{max}} = \frac{1000 \cdot 125}{3,14 \cdot 160} = 248,8 \text{ об / хв},$$

звідси випливає що мінімальна швидкість різання дорівнює, м / хв:

$$v_{min} = \frac{\pi D_{max} n_{min}}{1000}$$

де  $D_{max}$  - максимальний діаметр фрези;

$$D_{max} = 160 \text{ мм}.$$

$$v_{min} = \frac{\pi \cdot 160 \cdot 248,8}{1000} = 124,99 \text{ м / хв}$$

Потужність різання, кВт:

$$N_{рез} = N_{ели} [15]$$

де  $N_{ели}$  - потужність електродвигуна;  $N_{ел} = 27,2 \text{ кВт}$ ;

$$\eta_{ед} - \text{ККД від електродвигуна до шпинделя; } \eta_{ед} = 1.$$

$$N_{рез} = 27,2 \cdot 1 = 27,2 \text{ кВт},$$

Сили різання, Н:

$$P_z = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot N_{рез}}{v_{min}}$$

$$P_z = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot 27,2}{124,99} = 13057 \text{ Н}$$

Оскільки  $P_y$  сила становить 0,3 ... 0,5  $P_z$  сили, то:

$$P_y = 0,4 P_z;$$

$$P_y = 0,4 \cdot 13057 = 5222,8 \text{ Н}$$

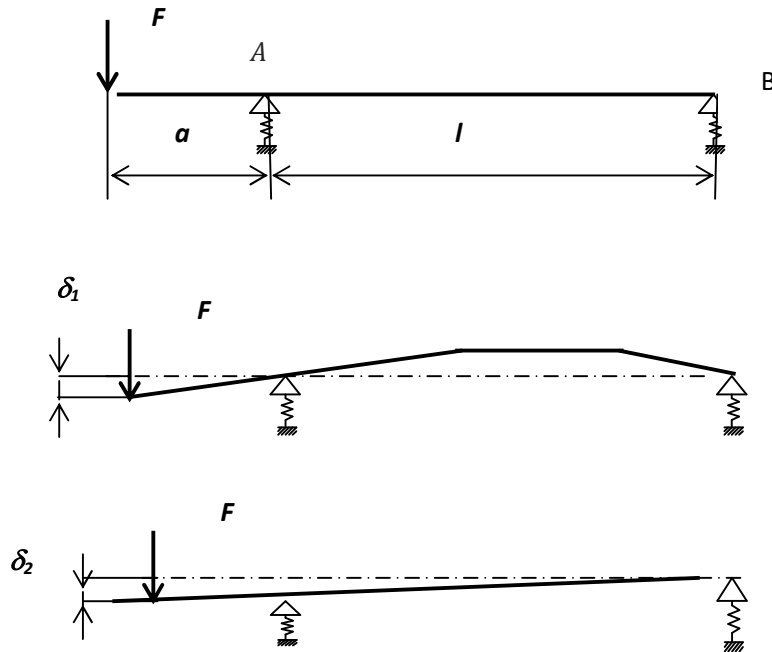


Рис 5.6.2 - Розрахункова схема шпиндельного вузла

### Визначення реакції і жорсткості опор

Особливість методики розрахунку на жорсткість в тому, що спочатку опори вважаються абсолютно жорсткими, а тіло шпинделя деформується, податливим. Знаходимо зміщення осі шпинделя. Потім вважаю сам шпиндель абсолютно жорсткий, а опори податливий.

Спочатку знаходить реакцію опор. Для цього складаємо рівняння моментів щодо опор  $A$  і  $B$ .

$$F = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} = \sqrt{13057^2 + 5222,8^2} = 14060 \text{ Н}$$

$$\Sigma M_A = 0; -R_B \cdot l + F \cdot a = 0$$

$$\Sigma M_B = 0; -R_A \cdot l + F(a + l) = 0$$

Звідси

$$R_B = \frac{F \cdot a}{l} = \frac{14060 \cdot 198}{386} = 7212,12 H$$

$$R_A = \frac{F(l+a)}{l} = \frac{14060(386+198)}{386} = 21272,124 H$$

Визначення жорсткості опор А і В. Жорсткість комплексної опори А:

$$j_A = k_1 \cdot C^{2/3} \cdot F^{1/3}_H,$$

$$\text{где } C = 10^5 \cdot z \cdot \sin^{5/2} \alpha \cdot a \cdot \sqrt{1,25 \cdot d_{ш}};$$

$F_H$  - сила натягу;

$z$  - число тіл кочення в підшипнику;

$\alpha$  - фактичний кут нахилу в підшипнику;

$d_{ш}$  - діаметр кульки.  $k_1 = 3$  [с.176,1];

$$z = 12;$$

$$\alpha = 15^\circ [1, \text{рис.6.14}];$$

$$d_{ш} = 11 \text{ мм};$$

$$F_H = 570 \text{ Н} [1, \text{табл.6.15}];$$

$$C = 10^5 \cdot 12 \cdot \sin^{5/2} 15^\circ \cdot \sqrt{1,25 \cdot 11} = 1,42 \cdot 10^5$$

$$j_A = 3 \cdot 1,42 \cdot 10^{10/3} \cdot 570^{1/3} = 0,78 \cdot 10^5 \text{ Н / мм}$$

Жорсткість опори В, аналогічна жорсткості опори А, так як вони однакові в компонуванні і дорівнює  $j_B = 0,78 \cdot 10^5 \text{ Н / мм}$ .

Розрахунок загального зміщення переднього кінця шпинделя

Знаходимо моменти інерції поперечного перерізу вильоту шпинделя і межопорної відстані

$$I = 0,05(d_{нар}^4 - d_{вн}^4);$$

$$I_1 = 0,05(65^4 - 35^4) = 8,2 \cdot 10^5 \text{ мм}^4;$$

$$I_2 = 0,05(67^4 - 42^4) = 8,5 \cdot 10^5 \text{ мм}^4$$

Пружне переміщення переднього кінця шпинделя, складається з усіх переміщень:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = F \left[ \frac{a^3}{3EI_1} + \frac{a^2 l}{3EI_2} + \frac{j_A a^2 + j_B (l+a)^2}{j_A j_B l^2} \right];$$

де  $E$  - модуль пружності матеріалу шпинделя

$$E = 2 \cdot 10^5.$$

$$\delta = 14060 \cdot \left[ \frac{198^3}{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 8,2 \cdot 10^5} + \frac{198^2 \cdot 386}{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 8,5 \cdot 10^5} + \frac{0,78 \cdot 10^5 \cdot 198^2 + 0,78 \cdot 10^5 (386 + 198)^2}{0,78 \cdot 10^5 \cdot 0,78 \cdot 10^5 \cdot 386^2} \right] = 5,4 \text{ мм.}$$

Кут повороту шпинделя в передній опорі:

$$\theta = \frac{F a l}{3EI_2} = \frac{14060 \cdot 198 \cdot 386}{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 8,5 \cdot 10^5} = 0,002107 \text{ рад.}$$

### Висновок

За ГОСТ 30027-93 допуск на осьове переміщення шпинделя після прикладення навантаження від 5000 до 10000 Н не повинен перевищувати 0,012 мм. За розрахунком переміщення кінця шпинделя вийшло 0,0054 мм, що допустимо. Кут повороту шпинделя в передній опорі дорівнює 0.002107 рад. Можна зробити висновок, що шпиндель має високу жорсткість, а отже високу точність.

## **6. КОНСТРУКЦІЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ШПИНДЕЛЯ, СПИСОК ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ**

Конструкція високошвидкісного шпинделя повинна враховувати вимоги замовника: необхідну потужність, швидкість, момент, тип системи затиску інструменту, точність і довговічність. Залежно від цих вимог вибираються необхідні комплектуючі, включаючи підшипники, конструкцію вала, двигун, системи змащення і охолодження.

Як було показано вище, в особливу увагу при конструюванні шпинделя приділяється підшипників. У ряді випадків високошвидкісні шпинделі працюють на максимально можливих швидкостях і вичерпують швидкісний ліміт підшипників для забезпечення максимальної продуктивності. Вбудовані інтегровані двигуни мають обмежений крутний момент. У конструкціях високошвидкісних шпинделів використовуються прецизійні підшипники в комбінації з системою повітряно-масляного змащення. Це вид мастила не тільки дозволяє збільшити швидкість обертання на 20% і більше, але і виконує функції охолодження і очищення підшипників. Для забезпечення безвідмовної роботи необхідно регулярне технічне обслуговування. Подача стисненого повітря в лабіринтове ущільнення забезпечують захист підшипників від забруднень.

Особливе значення для безвідмовної роботи високошвидкісного шпинделя має система затиску інструменту. Наступним питанням граничної важливості є балансування шпинделя, системи затиску, інструменту. Запорукою успіху застосування ВСО є правильний вибір інструменту та стратегії обробки.

Таким чином, конструкція високошвидкісного шпинделя являє собою цілий ряд компромісів. Максимально можлива швидкість різання визначається розміром і типом підшипників. Збільшення преднатяга і установка додаткових підшипників збільшують жорсткість, але знижують швидкість. Велика

потужність двигуна збільшує габарити і вимагає більш складних приводів. Велика швидкість вимагає точніших і складних систем затиску інструментальних систем, кращого балансу і чистоти.

### **Основні вимоги**

Дуже важливим є вибір типу останньої передачі на шпиндель.

Межопорное відстань для шпинделів верстатів нормальної точності приймають рівним 4 ... 5 діаметрам шпинделя в передній опорі.

Жорсткість  $j$  шпинделів легких і середніх верстатів нормальної точності, умовно розглядаються у вигляді балки на шарнірних опорах з силою по середині, повинна бути не менше 50 н / мкм. Для верстатів підвищеної точності приймають  $j \geq 50$  н / мкм.

Приводні шестерні шпинделів повинні виконуватися по 6 ... 7 ступеня точності, мати щільні посадки і розташовуватися безпосередньо біля опор.

### **Вимоги, що пред'являються до шпиндельним вузлів**

Основними критеріями працездатності шпиндельних вузлів є: геометрична точність, жорсткість, швидкохідні, довговічність, динамічні характеристики.

Точність обертання шпинделя оцінюється величиною радіального або торцевого биття його базових поверхонь. Величина цього биття залежить від класу точності верстата і регламентується відповідним ГОСТ (ДСТУ). Так, наприклад, для токарних верстатів нормальної точності допуск радіального і торцевого биття становить 5 ... 8 мкм.

Жорсткість шпиндельного вузла визначається пружними переміщеннями переднього кінця шпинделя під дією сил різання і також регламентується ГОСТ. Нормативне значення жорсткості для верстатів класів Н

і П становить (50 ... 70) н / мкм. Максимальне значення жорсткості шпиндельного вузла в основному визначається піддатливістю його опор.

Швидкохідність шпинделів оцінюється твором діаметра шпинделя  $d$  в передній опорі на частоту обертання  $n$ . Для шпиндельних вузлів на підшипниках кочення показник швидкохідності  $d \cdot n$  становить  $(2,5 \dots 3) 10^6$  мм.об / хв.

Довговічність шпиндельних вузлів оцінюється ресурсом роботи в годинах без втрати первісної геометричної точності.

Динамічні характеристики шпинделів оцінюються амплітудами вібрацій на потенційно-нестійких формах коливань. Стійкість динамічної системи шпиндельного вузла тим вище, чим вище перша власна частота коливань. Частоти власних коливань шпинделів змінюються в широких межах (100 ... 600) Гц і призводять до порушення автоколебаний при різанні. Тому для забезпечення сталого різання доводиться навмисне знижувати режими і продуктивність різання.

### **Основні питання при конструюванні високошвидкісного шпинделя:**

1. Тип шпинделя: з ремінною передачею або моторшпиндель з вбудованим мотором
2. Підшипники шпинделя: тип, кількість, конфігурація, вид мастила
3. Мотор: з ремінною передачею, моторшпиндель, потужність, розміри
4. Система затиску інструменту і інструментальні оправки
5. Корпус шпинделя: розміри, вид монтажу

Зазначені питання будуть обговорені нижче стосовно сучасного оброблюючого центру з системою ЧПУ з можливістю автоматичної зміни інструменту (АТС).

Тип шпинделя: з ремінною передачею або з вбудованим мотором

Перше рішення, яке повинно бути прийнято: який шпindel необхідний - з ремінною передачею або з вбудованим мотором (моторшпindel). Це визначається вимогами до верстата - необхідною швидкістю обертання, потужністю і жорсткістю. Вартість також є істотним чинником. Шпindel з ремінною передачею має принципово меншу вартість, ніж моторшпindel.

Типовий шпindel з ремінною передачею включає в себе встановлений в корпус шпindelний вал на підшипникових опорах. Він забезпечений системами затиску і розжиму інструменту, причому механізм розжиму інструменту в більшості випадків монтується ззовні.

Потужність і обертання передаються шпindelю від зовнішнього мотора, який встановлюється в безпосередній близькості від шпинделя. Момент передається до шпинделя за допомогою пасової передачі. Потужність, момент і швидкість шпинделя визначаються характеристиками мотора і передавальним відношенням пасової передачі.

Принципові переваги шпинделя з ремінною передачею полягають в наступному:

1. Порівняно низька вартість: шпindel складається з декількох базових компонентів, і його вартість порівняно низька в порівнянні з альтернативними рішеннями.

2. Широкий діапазон технічних даних: так як потужність, момент і швидкість шпинделя визначаються характеристиками мотора, кінцева специфікація шпинделя може бути змінена за рахунок вибору іншого мотора або іншого передавального відношення. У деяких випадків для збільшення швидкості обертання використовують зубчасті передачі.

3. Висока потужність і момент: Мотор розташовується поза шпинделем, отже, тут можна використовувати мотор дуже великого діаметру, що забезпечить високий момент і потужність.



Однак слід зазначити обмеження шпинделів з ремінною передачею, особливо істотних при високошвидкісній обробці:

1. Обмеження максимальної швидкості: Шпиндель з ремінною передачею обмежений по швидкості внаслідок наступних чинників. Механічні з'єднання, ремінь і система шківів мають обмежену швидкість. Якщо використовується пасова передача, висока швидкість обертання шківів призводить до розтягування і ременів, що обмежує передачу крутного моменту. Клиновидні ремені виключають цю проблему, зате на високих швидкостях при їх використанні виникає неприпустимий рівень вібрацій. Зубчасті зачеплення мають також низьку максимальну швидкість, схильні до вібрацій і до підвищеного нагрівання при високих швидкостях.

2. Ремінна передача знижує здатність навантаження підшипників: Передача моменту у розглянутих шпинделів передається за допомогою ремня і системи шківів. Натяг ремня створює постійну радіальне навантаження на задні підшипники шпинделя. Зі збільшенням потужності і швидкості шпинделя необхідний натяг і, відповідно, радіальне навантаження на підшипники також зростає і тим самим вичерпує радіальну навантажувальну здатність підшипників. Установка підшипників більшого діаметра або додаткового набору підшипників проблеми не вирішує, тому що ці заходи в свою чергу знижують максимально можливу швидкість обертання шпинделя.

## Висновки

Застосування шпинделів з ремінною передачею для високошвидкісної обробки можливо для ряду практичних завдань, де необхідна швидкість обертання шпинделя не перевищує 2 000 - 5 000 об / хв. Оскільки ми хочемо отримати швидкохідний шпиндельний вузол, де швидкість шпинделя є 12000 об / хв, то нам необхідно обирати серед мехатронних шпиндельних вузлів де передача

крутного моменту відбувається не через ременну передачу, а напряму, з мотора на шпиндель.

## 7. АНАЛІТИЧНО ІНФОРМАЦІЙНЕ ДОСЛІЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МЕХАТРОНИХ ЕЛЕКТРОШПИНДЕЛІВ

### 7.1. Типові приклади

#### Шпиндель з вбудованим мотором (моторшпиндель, електрошпиндель)

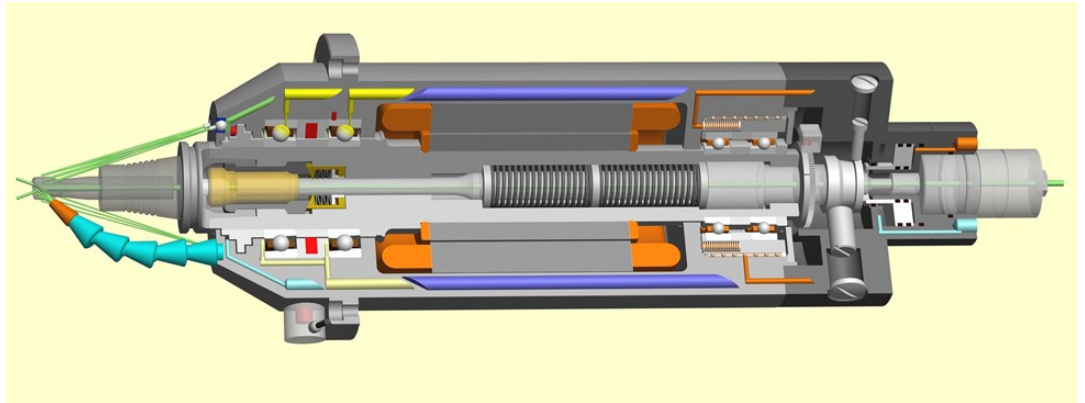


Рис.7.1.1 HF- моторшпиндель з оснащенням «Condition Monitoring» - датчиками і виконавчими елементами для контролю процесу високошвидкісної обробки

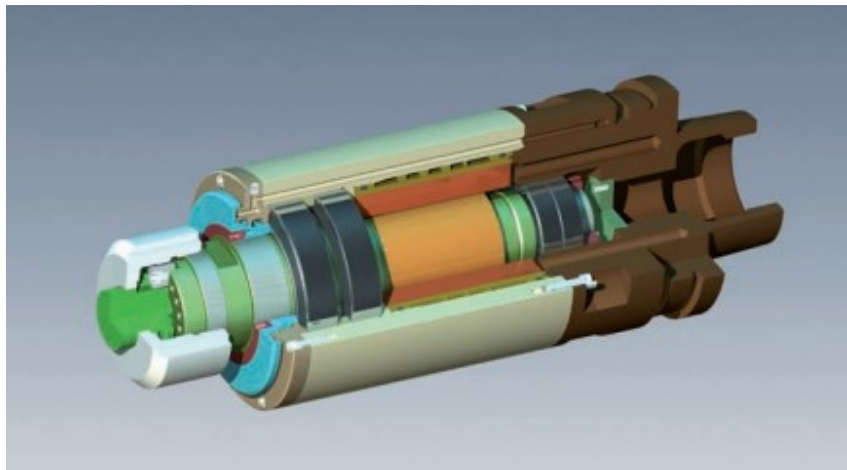


Рис. 7.1.2 Високошвидкісний шпиндель компанії SLF

Мотор інтегрований в корпус шпинделя і забезпечує можливість високих швидкостей обертання без обмежень, обумовлених ремінними і зубчастими передачами.

Моторшпиндель складається з встановленого на підшипниках шпиндельного вала, двигуна і системи затиску інструменту. Мастило в підшипниках закладено на весь термін служби або ж використовується повітряно-масляний туман. Повітряно-масляний туман дозволяє досягти більш високі - на 20% і вище швидкості обертання. Потужність електрошпинделя визначається потужністю мотора. Вибір шпинделя визначається вимогами верстата.

Даний варіант шпиндельного вузла, є оптимальним для нашого проекту, він є більш швидкохідним, що задовольняє наші потреби.



Рис. 7.1.3 Приклад шпиндельного вузла

## 8. ОПОРИ МЕХАТРОНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ

(тип, кількість, конфігурація, вид мастила)

Одним з найбільш критичних компонентів будь-якого високошвидкісного шпинделя є система підшипників. Шпиндель повинен відповідати високим швидкостями обертання, передавати необхідні крутний момент і потужність до інструменту, мати хорошу здатність навантаження і тривалий термін служби. Підшипники повинні забезпечувати всі ці вимоги.

В мехатронних шпиндельних вузлах використовують підшипники кочення гідростатичні підшипники та електромагнітні опори.

Багато хто з світових виробників пропонують високоточні підшипники кочення для високошвидкісної обробки (ВСО). Типи підшипників - роликові, роликові конічні, кулькові радіально-упорні. Критерії вибору підшипників залежать від призначення шпинделя шпинделя, як це показано в таблиці.

Критерії вибору підшипників

Таблиця 8

Вимоги:	Тип підшипників:	Вплив на параметри шпинделя
Висока швидкість	Малий кутовий контакт	Малий вал, низька потужність
Висока жорсткість	Великі ролики	Низька швидкість, великий вал
Аксіальна нагрузочна здатність	Великий кут контакту	Зниження швидкості

Радіальна нагрузочна здатність	Малий кутовий контакт	Підвищення швидкості
Висока	Великі ролики	Дорого,
точність	Великий кут контакту	низька швидкість
	Малий кут контакту	
	АВЕС 9,	
	Високий преднатяг	

Як видно з таблиці, вибір підшипників визначається багатьма факторами. Шпиндель, призначений для роботи з максимально можливою швидкістю обертання, не може мати високої жорсткості, шпиндель з високою жорсткістю не може обертатися на високих оборотах без різкого зменшення терміну служби підшипників. Таким чином, розробник шпинделя зобов'язаний вибрати найкраще компромісне рішення.

### 8.1 Радіально-упорні підшипники й роликopідшипники

Радіально-упорні підшипники найбільш часто використовуються в складі високошвидкісних шпинделів з високими швидкостями обертання через те, що вони забезпечують високу точність, навантажувальну здатність і швидкість для обробки металів. У деяких випадках використовуються роликopідшипники внаслідок їх більш високої здатності навантаження і жорсткості. Однак вони не забезпечують необхідну швидкість обертання.

Радіально-упорні підшипники містять прецизійні кульки, вбудованих в сталеві прецизійні кільця. Важливим критерієм вибору підшипників є

максимальна швидкість підшипника або досяжна швидкість обертання шпинделя. Це визначається типом підшипника, методом мастила, преднатягом, навантаженням, ... На практиці, основним вихідним пунктом є умовна величина  $dN$ , яка обчислюється шляхом множення середнього діаметра підшипника, вимірюваного в мм, на швидкість обертання, яка вимірюється в об / хв. Для високошвидкісних шпинделів з кульковими підшипниками  $dN$  досягає 1,500,000.

Одним з основних параметрів специфікації радіально-упорних підшипників є кут контакту. Кут контакту визначається як кут між лінією, що з'єднує точки контакту кульки і каналів в радіальній площині, у напрямку переданої від одного до іншого навантаження і лінією, перпендикулярною осі підшипника. Осьове навантаження радіально-упорних шарикопідшипників збільшується зі збільшенням кута контакту. Зазвичай кут контакту становить  $12^\circ$ ,  $15^\circ$  або  $25^\circ$ . Кут  $25^\circ$  вибирають, якщо шпиндель призначений в основному для свердління,  $15^\circ$  - для фрезерування.

Для радіально-упорних підшипників можлива різна величина переднавантаження: легка, середня і важка. Легко преднагруженні підшипники призначені для роботи на дуже високих швидкостях і мають меншу жорсткість. Важка переднавантаження забезпечує меншу швидкість, але максимальну жорсткість.

З метою забезпечити необхідну навантажувальну здатність шпинделя, призначеного для роботи з високою швидкістю обертання, групи по 2-3 підшипника в кожній групі, встановлюють в різних конфігураціях. Це дозволяє розподілити навантаження і збільшити загальну жорсткість шпинделя.

#### О - Конфігурація установки підшипників

Дуже часто використовується установка підшипників в «О» - конфігурації. Ця конфігурація забезпечує найбільш високу точність і жорсткість

шпинделя. При використанні «О» - конфігурації максимальні швидкості трохи знижуються, зате забезпечується однакова жорсткість шпинделя в обох осьових напрямках. Типовим застосуванням «О» - конфігурації є свердління.

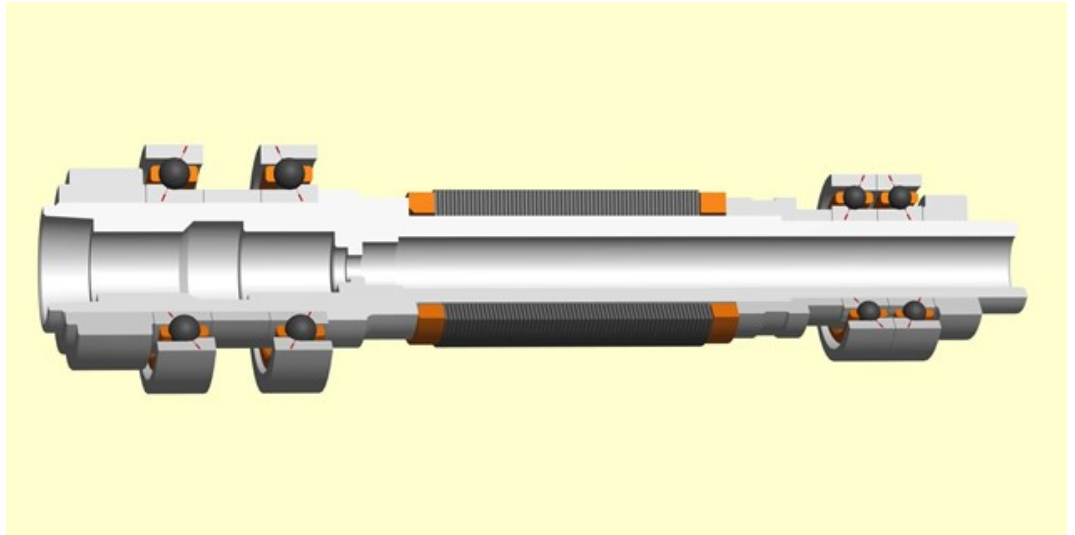


Рис.8.1.1 «О» - Конфігурація підшипників

«О- Тандем» - конфігурація установки підшипників

«О- Тандем» - конфігурація установки підшипників застосовується, як правило, для важких шпинделів і високих обертаючих моментів при знятті великих обсягів матеріалу і використанні довгих інструментів.

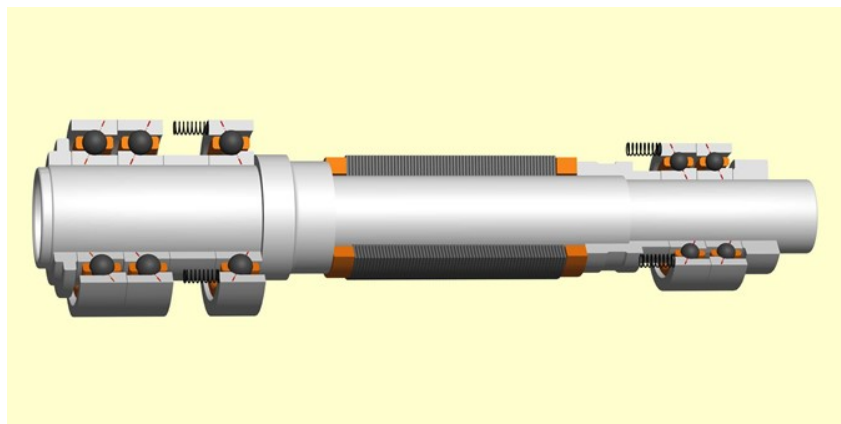




Рис.8.1.2 «О - Тандем» - Конфігурація установки підшипників

«Тандем» - конфігурація підшипників з преднатягом задніх підшипників

У більшості випадків для високошвидкісних шпинделів використовується «Тандем» - конфігурація підшипників. Тут 2-3 підшипника встановлюються один за іншим в носовій частині шпинделя, і таким же чином 2-3 підшипника встановлюються в задній частині шпинделя. «Тандем» - конфігурація підшипників є стандартною для шпинделів малих і середніх розмірів. Вона забезпечує максимально можливі швидкості обертання. Для збільшення моменту між підшипниками встановлюються проміжне кільце. Положення підшипників фіксується шпиндельним валом і корпусом шпинделя.

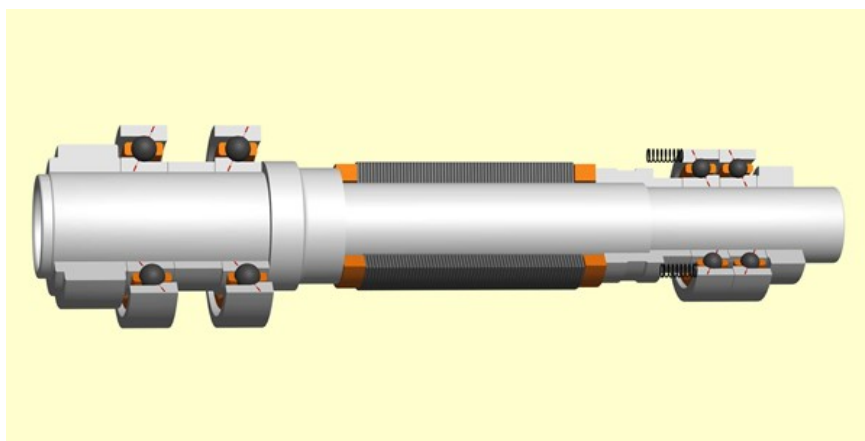


Рис 8.1.3 «Тандем» - Конфігурація установки підшипників

При роботі моторшпинделей природні теплові втрати і термічне розширення шпиндельного вала, призводять в першу чергу до втрат точності. Для компенсації теплового розширення задні підшипники встановлені на рухомій втулці. Сталість попереднього натягу задніх підшипників забезпечується пружиною.

## 8.2 Гібридні керамічні підшипники

Кроком вперед у технології виробництва підшипників стало використання кераміки (нітриду кремнію) для виготовлення прецизійних кульок. Гібридні керамічні підшипники мають наступні переваги.

- Маса керамічних кульок на 60% менше маси сталевих кульок. Цей факт має особливе значення при високих швидкостях обертання шпинделя, так як масою визначається величина відцентрової сили, яка притискає кульки до зовнішнього кільця. Наслідком є знос, і навіть деформація кульок. Більш легкі керамічні кульки менш схильні до впливу відцентрової сили. Їх використання дозволяє підвищити швидкості обертання на 30% без впливу на термін служби підшипників певного діаметру.

- Однією з найбільш часто зустрічаються причин зносу і виходу з ладу підшипників є холодне «мікро зварювання» матеріалу кульки з матеріалом підшипникових кілець. Цим обумовлюється зміна шорсткості поверхні кульки і кільця, що в свою чергу веде до підвищеної генерації тепла і пошкоджень підшипників. Застосування керамічних кульок практично знищує дію цього механізму, результатом чого є суттєве збільшення терміну служби підшипників.

- Керамічні підшипники генерують менше тепла. Керамічні кульки мають близьку до ідеальної форму. Внаслідок цього генерація тепла на високих оборотах різко знижується, що крім цього збільшує термін служби мастила.

- Застосування керамічних підшипників різко знижує рівень вібрацій шпинделя. Експериментальні дослідження показали, що гібридні керамічні підшипники мають більш високу жорсткість і більш високі частоти власних коливань. Це робить їх менш чутливими до зовнішніх вібрацій.

### **8.3. Види мастила підшипників**

Існує кілька видів мастила радіально-упорних підшипників для ВСО. Мастило повинна утворювати мікроскопічну плівку між обертовими деталями для запобігання абразивного зносу і корозії.

#### **8.3.1 Перманентне мастило**

Найбільш простим видом мастила є консистентна (перманентна) мастило. Таке мастило заповнює простір між кульками і кільцями підшипника і не змінюється весь термін служби підшипників. Переваги очевидні - мінімальна вартість і мінімальні витрати на технічне обслуговування. Однак перманентне мастило має ряд обмежень. При підвищенні швидкості обертання, зростає температура, що може негативно вплинути на властивості мастила. Збільшити кількість мастила не означає поліпшити якість підшипника. Перегріте мастило може спінитися і зіпсуватися. Приблизно 20-30% простору всередині підшипника повинно бути заповнене. Після введення мастила необхідний період притерання для розподілу мастила всередині підшипника.

Заміна мастила для високошвидкісних шпинделів не практикується. При заміні підшипників нове чисте мастило ретельно впорскується в підшипники, часто під тиском, щоб запобігти попаданню забруднень, які можуть привести до швидкого виходу з ладу підшипника.

#### **8.3.2 Повітряно-масляне мастило**

У багатьох випадках, коли потрібні високі швидкості обертання, перманентна мастило недостатня. Вона забезпечує значення dN до 850, 000. Повітряно-масляна мастило дозволяє підвищити це значення до 1,500, 000.

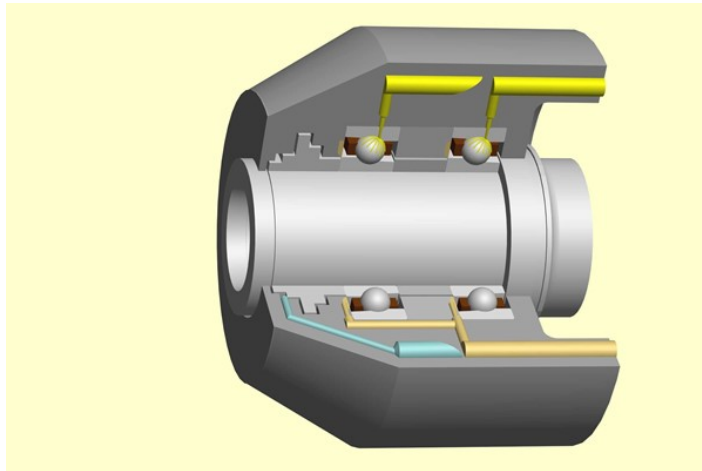


Рис. 8.3.2.1 Подача повітряно-масляного змащення до місця контакту кульки з кільцем підшипника

Найефективнішим мастилом підшипників шпинделів для ВСО є повітряно-масляне мастило. Точно розрахована кількість масла і повітря подаються під тиском у спеціальний механічний змішувач, звідки повітряно-масляна суміш по трубках надходить до підшипників шпинделя. Деякі шпинделі забезпечені АІ-мастилом. Тут мінімальна кількість масла подається через отвори малих розмірів безпосередньо до місця контакту кульки з кільцем підшипника. Цим оптимізується мастило підшипників і знижується їх нагрівання. На рис. 6 показаний механізм АІ-змазки.

Висновки:

Мастило підшипників є одним з найбільш критичних компонентів високошвидкісної шпиндельної установки. Залежно від вимог до шпинделя мастило може бути перманентним або повітряно-масляним. Стан системи змащення має регулярно перевірятися, стан підшипників підлягає спостереженню. Масло має бути чистим, повітря чистим і сухим. Від

правильного і регулярного технічного обслуговування залежить термін життя підшипників і шпинделя в цілому.

Термін служби підшипників залежить від багатьох факторів - швидкості, навантаження, мастила і розмірів підшипників. Існує багато комп'ютерних моделей для прогнозу терміну служби підшипників. Типовим терміном служби підшипників для ВСО при правильному використанні шпинделя 5000 - 7000 годин. Деякі шпинделі IBAG на певних швидкостях обертання мають розрахунковий термін служби 12 000 годин.

#### **8.4. Критерії вибору мотора**

Для моторшпинделів розміри і потужність мотора сильно обмежені розміром шпинделя. Як було показано вище, розміри підшипників є критичним фактором при розробці шпинделя. Розміри ротора мотора визначають вибір розмірів підшипників. Останні, в свою чергу, визначають навантажувальну здатність, жорсткість та максимальну швидкість шпинделя, так що характеристики мотора повинні бути узгоджені з можливостями підшипників.

Для високошвидкісних шпинделів найчастіше використовуються асинхронні двигуни АС. У таких конструкціях ротор з'єднаний з шпиндельним валом за допомогою клейкого матеріалу або за допомогою термічної усадки. Ротор і статор зазвичай поставляються виробниками моторів і приводів.

Шпиндельний вал займає центральне місце в конструкції шпинделя, тому що по ньому передається потужність від мотора до ріжучого інструменту. Важливо враховувати характеристику пружності шпиндельного вала, яка проявляється на високих швидкостях обертання. Частота згинальних коливань залежить від діаметра і довжини шпиндельного вала. Конструкція шпинделя з довгим шпиндельним валом має ряд переваг - збільшення навантажувальної здатності шпинделя і можливість установки мотора більшої потужності. Однак необхідно враховувати, що збільшення довжини шпинделя може привести до того, що частота згинальних коливань може наблизитися до робочих частот в зоні різання. В цьому випадку потрібно або збільшити діаметр шпиндельного вала, або зменшити його довжину.

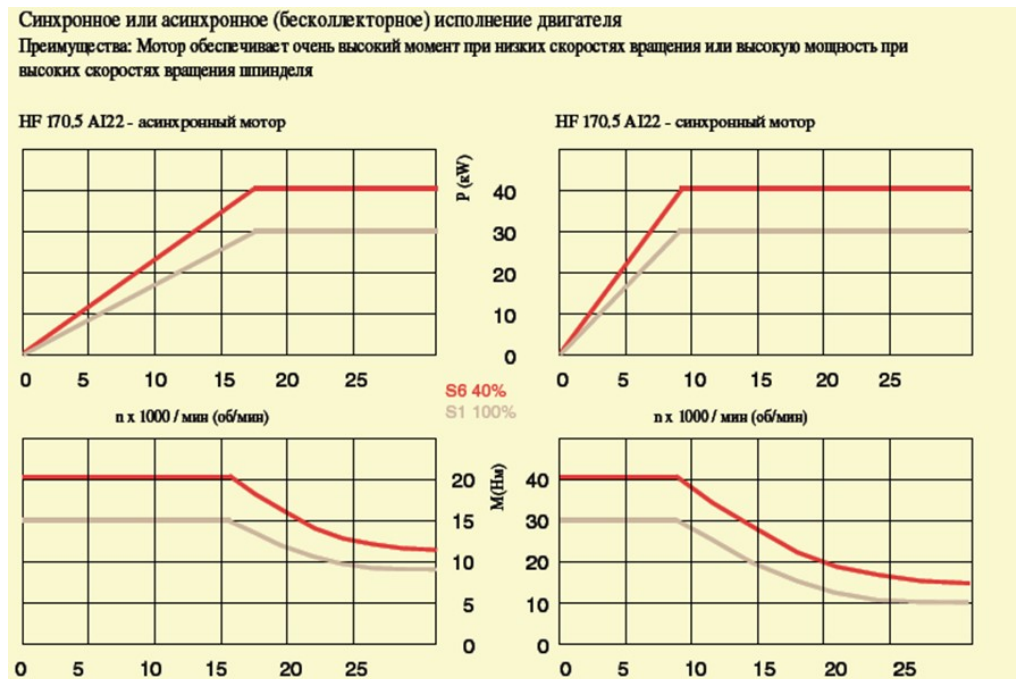


Рис. 8.4 Діаграми потужності і моменту моторшпинделей

Діаграми потужності і крутного моменту АС мотора визначаються дизайном намоток. Однак потужність залежить від швидкості, що пояснюється обмеженням обсягу мотора і відцентровими силами, що діють на ротор, що складається з окремих пластин.

Мотори, що використовуються в моторшпинделях, характеризуються постійним крутним моментом до досягнення базової швидкості і постійною потужністю після її досягнення. Так як потужність є функцією твору швидкості і моменту, наведені діаграми є типовими. Для нормальних шпинделів величина моменту збільшується за рахунок шківів і зубчастих передач.

У моторшпинделів ж потужність і швидкість, необхідні для виконання всіх видів обробки, визначаються тільки характеристиками мотора. Моторшпиндель проектується таким чином, щоб максимальна потужність досягалася на близькій до максимальної швидкості обертання.

Вбудовані асинхронні АС двигуни зазвичай є трифазними і приводяться в дію спеціальними електроприводами - частотними перетворювачами типу HF

(high frequency). Від перетворювача до шпинделя надходить струм змінної частоти і змінної напруги. Швидкість двигуна змінного струму визначається за такою формулою:

$$\text{Швидкість (об / хв)} = (\text{частота в Гц} \times 120) / (\# \text{ число полюсів двигуна})$$

Таким чином, двополюсний двигун з максимальною швидкістю 30 000 об / хв, вимагає приводу, здатного забезпечити повну напругу на вихідній частоті 500 Гц. Якщо застосовується чотирьох полюсний мотор, необхідна максимальна частота становить 1000 Гц.

Перетворювачі ультрависоких частот є роз'єднаними і подають напругу і струм до шпинделя в реальному часі без зворотного зв'язку в контурах струму і положення. Однак багато перетворювачі забезпечені магнітним або оптичним зворотним зв'язком, що забезпечує програмоване позиціонування шпинделя, кута повороту шпинделя і операції нарізування різьблення. Програмований кут повороту необхідний для верстатів з автоматичною зміною інструменту.



## 8.5. Конструкція повітряного лабіринтового ущільнення

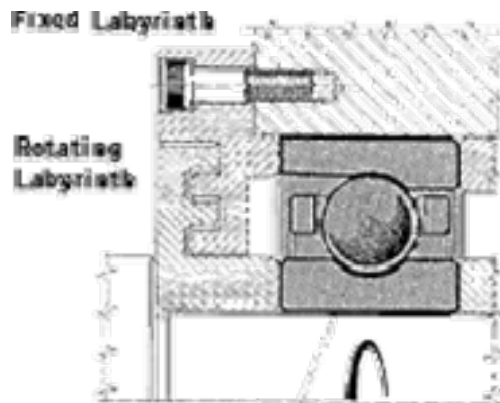


Рис. 8.5. Лабіринт і повітряне ущільнення (за матеріалами SNFA)

Підшипники для ВСО надзвичайно чутливі до зовнішніх забруднень. Попадання стружки, пилу, СОР і інших зовнішніх матеріалів в область підшипників можуть викликати пошкодження підшипників та навіть їх відмову. Це особливо стосується підшипників з перманентної мастилом.

Для захисту підшипників і шпинделя в цілому від попадання зовнішніх забруднень в конструкції шпинделя застосовуються спеціальні ущільнення. Найбільш часто використовуються повітряні ущільнення. Найбільш простим методом захисту є подача стисненого повітря під низьким тиском всередину шпинделя. Потік цього повітря під низьким тиском виходить назовні в носовій і задній частині шпинделя, що захищає шпиндель від попадання забруднень всередину.

Це особливо важливо для моторшпинделей, так як часто зустрічається «Камінний ефект». При роботі шпинделя ротор нагрівається. Утворене тепло через підшипники передається до шпиндельного валу, який в свою чергу нагрівається. При зупинці шпинделя, гарячий вал нагріває навколишнє повітря, яке розширюється і, як в каміні, піднімається вгору, часто несучи з собою

забруднення, які можуть потрапити всередину шпинделя. Ця обставина є особливо критичною при обробці графіту.

Найбільш уразлива передній кінець шпинделя. Передні підшипники розташовуються дуже близько до зони різання і повинні бути особливо ретельно захищені від попадання забруднень. Звичайні контактні ущільнення не працюють в умовах ВШО. Для високошвидкісних шпинделів використовуються лабіринтові ущільнення. Це безконтактна система ущільнень, що складається з нерухомої і обертаючої частин. Обидві частини відповідають один одному за формою і забезпечені системою пазів, що утворюють перепускний канал для виходу стисненого повітря. Якщо тиск при підключенні в шпиндель стисненого повітря відповідає заданим в інструкції по експлуатації параметрам, шпиндель гарантований від попадання забруднень всередину.

## **8.6. Системи кріплення інструменту**

У сучасних верстатах з ЧПУ часто використовуються системи автоматичної зміни інструменту (ATC Automatic Tool Change). Найбільш широке застосування знайшли системи CAT, BT і ISO. В недалекому минулому з'явилися спеціально призначені для BCO системи HSK.

Системи CAT, BT, і ISO були розроблені без урахування особливостей BCO. Застосування цих систем робить негативний вплив на точність і якість оброблених поверхонь. Особливо критичним моментом, є балансування.

Шпиндель повинен забезпечувати можливість встановити і затиснути оправлення. Для цього на носовому кінці шпиндельного вала є конус, точно відповідний специфікаціям CAT, BT, ISO і HSK. Крім цього необхідна наявність механізму затиску, що забезпечує утримання оправки в шпинделі при обробці. Це пристрій - затискна тяга - забезпечує достатнє зусилля, що перевищує всі сили, що діють в процесі різання. Найбільш часто використовується пакет тарілчастих пружин для створення постійного зусилля. Один кінець тяги захоплює головку інструментальної оправки і утримує оправлення в конусі. При зміні інструменту гідравлічний або пневматичний циліндр віджимає тягу і звільняє оправлення.

Шпинделі виробництва IBAG Switzerland AG адаптовані під всі наявні на світовому ринку інструментальні патрони. Вбудовані системи затиску HSK по DIN 69893, BT, BBT, IBAG SKI, SK, CAPTO Coromant вибираються в залежності від розміру шпинделя і необхідної максимальної швидкості обертання. Система IBAG SKI краща для шпинделів малих і середніх розмірів, HSK рекомендується для шпинделів, діаметр яких перевищує 120 мм. Патрони BT і BBT знайшли широке поширення в США і Азії.



Рис. 8.6. Вбудована система затиску HSK по DIN 69893 може використовуватися з прецизійними цангами, оправками Weldon, патронами, які працюють за принципом "гарячої усадки», шліфувальними оправками

Якщо шпиндель використовується на верстаті, оснащеному системою автоматичної зміни інструменту через інструментальний магазин, шпиндель оснащується спеціальними датчиками для контролю положення інструментальної оправки.

### Висновок

Конструкція високошвидкісного шпинделя повинна враховувати всі поставлені вимоги: необхідну потужність, швидкість, момент, тип системи затиску інструменту, точність і довговічність. Залежно від цих вимог вибираються необхідні комплектуючі, включаючи підшипники, конструкцію вала, двигун, системи змащення й охолодження.

Як було показано вище, в особливу увагу при конструюванні шпинделя приділяється підшипникам. У ряді випадків високошвидкісні шпинделі працюють на максимально можливих швидкостях і вичерпують швидкісний ліміт підшипників для забезпечення максимальної продуктивності. Вбудовані інтегровані двигуни мають обмежений крутний момент. У конструкціях високошвидкісних шпинделів використовуються прецизійні підшипники в комбінації з системою повітряно-масляного змащення. Це вид мастила не тільки дозволяє збільшити швидкість обертання на 20% і більше, але і виконує функції охолодження і очищення підшипників. Для забезпечення безвідмовної роботи необхідно регулярне технічне обслуговування. Подача стисненого повітря в лабіринтове ущільнення забезпечують захист підшипників від забруднень.

Особливе значення для безвідмовної роботи високошвидкісного шпинделя має система затиску інструменту. Наступним питанням граничної важливості є балансування шпинделя, системи затиску, інструменту. Запорукою успіху застосування ВСО є правильний вибір інструменту та стратегії обробки.

Таким чином, конструкція високошвидкісного шпинделя являє собою цілий ряд компромісів. Максимально можлива швидкість різання визначається розміром і типом підшипників. Збільшення преднатяга і установка додаткових підшипників збільшують жорсткість, але знижують швидкість. Велика потужність двигуна збільшує габарити і вимагає більш складних приводів. Велика швидкість вимагає точніших і складних систем затиску інструментальних систем, кращого балансу і чистоти.

Серед усіх варіантів обираємо шпиндельний вузол, двигун в якому знаходиться між опорами, тобто є інтегрованим.

## 9. ВИБІР МЕХАТРОНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА. КОНСТРУКЦІЯ ТА ВИРОБНИКИ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ

### 9.1. Варіанти представлення виробником верстату

Двигун	Обертаний статичний момент	Номинальна швидкість	Вихідна потужність	Примітка
FANUC:0i- 3/10000i	23.5/35 Нм	10000 об/мин	3.7/5.5 кВт	Стандартна комплектація
FANUC:0i- 6/10000i	26.3/39.4 Нм	10000 об/мин	5.5/7.5 кВт	Опція
SIEMENS: 1PH7 101	23.6 Нм	9000 об/мин	3.7/4.9 кВт	Опція
Huazhong CNC: GM7103- 4SB61	35 Нм	9000 об/мин	5.5/7.5 кВт	Опція
HuazhongGSK:ZJ Y132-3.7	14/24 Нм	10000 об/мин	3.7/5.5 кВт	Опція

### FANUC

Компанія FANUC знаходиться в авангарді світової промислової революції. Компанія була заснована в 1956 р доктором технічних наук Сеіуеомом Інаба, який з першого дня її роботи впроваджував концепцію числового програмного керування (ЧПК). Почавши в кінці 1950-х з автоматизації окремих одиниць обладнання, кілька десятиліть по тому компанія FANUC вже займалася автоматизацією цілих виробничих ліній. А основою для такого інноваційного зростання послужило винахід доктора Інаба: він створив перший

електричний кроковий двигун, застосував для нього числове програмне управління і встановив цей двигун в верстат.

Постійно розширюючи межі автоматизації, підвищуючи якість продукції і продуктивність, а також скорочуючи витрати, доктор Інаба і його команда спроектували роботи для завантаження верстатів.

Розробки доктора Інаба в подальшому дозволили іншим виробникам і машинобудівним компаніям в усьому світі використовувати переваги даної технології, і, як наслідок, скоротити витрати і підвищити продуктивність. Коли в 1970-80-х роках на виробництві з'явилися такі першокласні продукти, як ROBOCUT, ROBODRILL і ROBOSHOT, компанія FANUC запропонувала оптимізовані рішення для різноманітних сфер застосування, що задовольняють вимогам різних замовників. В Японії FANUC стала першою компанією, яка побудувала і експлуатує автоматичне підприємство з верстатами з ЧПУ і роботами.

Компанія FANUC, заснована 60 назад, є провідним світовим виробником обладнання для автоматизації виробництва і має досвід установки в різних країнах понад 4 мільйони контролерів ЧПУ і 550 000 роботів. Але принципи компанії FANUC залишаються незмінними. Це тверда прихильність до розширення кордонів автоматизації і прагнення допомогти замовникам в оптимізації виробничих процесів.

αil-B series																				
Power [kW]	0.55	1.1	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	9	11	15	18.5	22	26	30	37	45	60	75	100	150
αil-B (200V) Standard induction	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*		*	*	*				
Maximum speed [rpm]	10000 15000	10000	10000 20000	10000 20000 24000	10000 12000 20000	10000 12000 15000	8000 10000 12000			8000 12000				6000 7000		5000				
αil-B (400V) Standard induction	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*
Maximum speed [rpm]	1000		10000 20000		10000		8000 12000		8000	8000 10000		8000 10000		6000 7000		5000				
αilP-B (200V) Wide constant power range						*	*	*	*	*	*	*								
Maximum speed [rpm]							8000			6000		5000 6000								
αilP-B (400V) Wide constant power range						*	*	*	*	*	*	*								
Maximum speed [rpm]							8000		8000		6000	5000 6000								
αilT-B (200V) Coolant through			*	*	*	*	*		*	*	*	*								
Maximum speed [rpm]			20000	20000 24000	12000 20000	12000 15000			12000	15000		10000								
αilT-B (400V) Coolant through			*	*	*	*	*		*	*	*	*								
Maximum speed [rpm]			20000		12000					15000		10000								
αilL-B (200V) Liquid cooled										*	*	*								
Maximum speed [rpm]										20000	15000		15000							
αilL-B (400V) Liquid cooled										*	*	*	*							
Maximum speed [rpm]										20000	15000		15000							

Рис. 9.1.16 Таблица варіантів шпиндельних вузлів FANUC

## SIEMENS

Лінійка моторшпінделей 2SP1 Siemens - це компактні стандартні моторшпінделі для фрезерних верстатів, які є альтернативою шпинделям з ремінною передачею і використовуються як для чорнової обробки, так і для точної чистової обробки. Моторшпіндель 2SP1 має всі класичні елементи моторшпинделя, наприклад, інструментальний інтерфейс, пристрій зміни інструменту, соответствующієподшипнікі шпинделя, вбудований приводний двигун з водяним охолодженням, корпус шпинделя з необхідними кріпильними елементами і датчики для фіксації і контролю зміни інструменту.

Доступні моторшпінделі 2-х діаметрів на 200 мм (2SP120) і 250 мм (2SP125), вони пропонуються з різними моментами обертання і числом оборотів, придатними для фрезерних верстатів. Моторшпінделі були спеціально розроблені для використання спільно з SINAMICS S120.

Вся лінійка моторшпінделей 2SP1 була розроблена спільно з фірмою Weiss Spindeltechnologie GmbH і проводиться на цій фірмі.



## Переваги 2SP1 Siemens

Моторшпінделі 2SP1 в порівнянні зі звичайними рішеннями з ремінною передачею пропонують користувачеві наступні істотні переваги:

- Компактне шпиндельні рішення "all inclusiv" ("все включено") в шпиндельній бабці

- Невелика кількість компонентів і простий монтаж

- Рентабельне стандартне рішення в порівнянні з сучасними рішеннями з ремінною передачею

- Передача обертання з високою жорсткістю

- Високі моменти обертання і швидкості і тим самим висока продуктивність, завдяки високій потужності різання і скорочення допоміжного часу

- Більш висока швидкість і більш короткий час розгону в порівнянні зі звичайними ремінними або редукторні рішеннями

- Рентабельне пневматичний пристрій разжима інструменту або, як опція, швидке гідравлічний пристрій разжима інструменту

- Поставка системи, в усьому світі включаючи механіку шпинделя з одних рук від Siemens

- Дуже короткий час зміни інструменту у 2SP210 завдяки 2-канальній техніці і опціонального фіксатора

## Область застосування 2SP1 Siemens

Основною областю застосування моторшпінделей 2SP1 є шпинделі головного руху для простих фрезерних верстатів і обробних центрів в дрібносерійне виробництво.

Моторшпінделі 2SP120 призначені для легкооброблюваних сплавів з невеликими моментами і високою швидкістю обробки.

Моторшпінделі 2SP125 характеризуються високим моментом обертання.  
Призначені для обробки сталі і чавуну.

#### Конструкція 2SP1 Siemens

Моторшпінделі 2SP1 характеризуються надійною конструкцією.

Залежно від виконання для моторшпінделей 2SP1 є наступні опції:

- різні інструментальні інтерфейси
- внутренее охолодження інструменту
- зовнішнє охолодження інструменту
- Інтеграція 2SP1 Siemens

-Моторшпінделі 2SP1 можуть працювати з: SINAMICS S120,  
SINUMERIK 840Di sl, SINUMERIK 840D sl

Для синхронних моторшпінделей 2SP1 необхідно використовувати модуль захисту напруги VPM як зовнішній модуль або Internal Voltage Protection IVP як вбудовану функцію SINAMICS, см. Модуль захисту напруги VPM.

Моторшпінделі 2SP1 - огляд номенклатури виробів

Номінальна число оборотів: До 18,000 об / хв

Номінальна потужність: 11.7 - 53.4 кВт

Номінальний момент: 42 - 170 Нм

Selection and ordering data

Rated speed $n_{rated}$ rpm	Shaft height SH	Rated power $P_{rated}$ kW/HP	Rated torque $M_{rated}$ Nm/lb.-ft	Rated current $I_{rated}$ A	Rated voltage $V_{rated}$ V	Speed during field weakening <sup>1)</sup> $n_2$ rpm	Max. permissible continuous speed <sup>2)</sup> $n_{s1}$ rpm	Max. speed <sup>3)</sup> $n_{max}$ rpm	1PH7 asynchronous motor Order No.
480 V 3 AC line voltage, Servo/Vector Control									
2000	100	4.7/6	22/16.2	10	459	7580	5500	9000	1PH7101- ■■■ F ■■■-■■■...
		7/9.4	33/24.3	13	459	4100	5500	9000	1PH7103- ■■■ F ■■■-■■■...
		9/12.1	43/31.7	17.5	450	7160	5500	9000	1PH7105- ■■■ F ■■■-■■■...
		11/14.8	53/39.1	23	433	5500	5500	9000	1PH7107- ■■■ F ■■■-■■■...
	132	15/20.1	72/53.1	25	459	5660	4500	8000	1PH7131- ■■■ F ■■■-■■■...
		20/26.8	96/70.8	34	459	5910	4500	8000	1PH7133- ■■■ F ■■■-■■■...
		24/32.2	115/84.8	42	459	6730	4500	8000	1PH7135- ■■■ F ■■■-■■■...
		28/37.6	134/98.8	55	402	4000	4500	8000	1PH7137- ■■■ F ■■■-■■■...
	160	37/49.6	177/130.4	70	412	4000	3700	6500	1PH7163- ■■■ F ■■■-■■■...
		45/60.4	215/158.5	76	459	3250	3700	6500	1PH7167- ■■■ F ■■■-■■■...
2650	100	8/10.7	29/21.4	16.5	440	7500	5500	9000	1PH7103- ■■■ G ■■■-■■■...
		13/17.4	47/34.6	24.5	459	7500	5500	9000	1PH7107- ■■■ G ■■■-■■■...
	132	24/32.2	87/64.1	42	450	4000	4500	8000	1PH7133- ■■■ G ■■■-■■■...
		30/40.2	108/79.6	52	450	4250	4500	8000	1PH7137- ■■■ G ■■■-■■■...
	160	40/53.6	144/106.1	76	433	3500	3700	6500	1PH7163- ■■■ G ■■■-■■■...
		44/6	159/117.2	77	459	3250	3700	6500	1PH7167- ■■■ G ■■■-■■■...

Рис. 9.1.26 Таблиця варіантів шпиндельних вузлів SIEMENS

## Huazhong CNC

Huazhong CNC досліджує, розробляє, виробляє та реалізує продукти ЧПУ по всьому світу. Компанія пропонує контролери з ЧПУ для токарних верстатів, фрезерних верстатів та обробних центрів; Машини з ЧПУ; сервоприводи та двигуни; і верстати. Його вироби з ЧПУ використовуються в різних галузях промисловості, таких як текстильна та механічна промисловість для автоматизації машин; та навчальні центри підготовки технічного персоналу. Компанія також надає інфрачервоні продукти, включаючи термокамери з скануванням лихоманки, системи інфрачервоного моніторингу, шляхетери, термічні камери нічного бачення та портативні інфрачервоні термографічні вироби, які використовуються в енергетичній, медичній, хімічній та металургійній промисловості.

Motor Type	Rated Power Kw	Rated Torque Nm	Rated Current A	Rated Rotary Speed r/min	Maximum Speed * r/min	Rotating Inertia Kgm <sup>2</sup>	Weight Kg	Adaptive Spindle Drive
GM7100-4SB61	2.2	14	6	1500	6000/9000	0.015	25	HSV-180S-25/2.5
GM7101-4SB61	3.7	23.6	10	1500	6000/9000	0.02	35	HSV-180S-35/2.1
GM7102-4SB61	3.0	19.1	8	1500	6000/9000	0.015	25	HSV-180S-35/2.6
GM7103-4SA61	3.7	35.3	10	1000	6000/9000	0.02	35	HSV-180S-35/2.1
GM7103-4SB61	5.5	35	13	1500	6000/9000			HSV-180S-50/2.3
GM7103-4SC61	7.5	35.8	18.8	2000	6000/12000			HSV-180S-75/2.3
GM7105-4SB61	7.5	47.8	18.8	1500	6000/8000	0.032	55	HSV-180S-75/2.3
Motor Type	Rated Power Kw	Rated Torque Nm	Rated Current A	Rated Speed r/min	Maximum Speed * r/min	Rotating Inertia Kgm <sup>2</sup>	Weight Kg	Adaptive Spindle Drive
GM7107-4SA61	6.3	60.2	19.4	1000	6000/8000	0.032	55	HSV-180S-75/2.2
GM7130-4SB61	5.5	35	13	1500	6000/8000	0.042	78	HSV-180S-50/2.3
GM7132-4SB61	7.5	47.8	18.8	1500	6000/8000	0.042	78	HSV-180S-75/2.3

Рис. 9.1.3б Таблица варіантів шпиндельних вузлівHuazhongGSK

## 9.2. Компанії та задовільні варіанти шпинделних вузлів

Серед шпиндельних вузлів які представлені виробником, жодний нам не підходить, отже необхідно підібрати за заданими характеристиками інший шпиндельний вузел. Серед компаній FANUC, SIEMENS та Huazhong CNC, є пропозиції які задовільняють нас, тому ми також будемо обирати і серед них.

### FANUC

αiL-B series																				
Power [kW]	0.55	1.1	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	9	11	15	18.5	22	26	30	37	45	60	75	100	150
αiL-B [200V] Standard induction	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*		*	*	*				
Maximum speed [rpm]	10000 15000	10000	10000 20000	10000 20000 24000	10000 12000 20000	10000 12000 15000	8000 10000 12000				8000 12000					6000 7000	5000			
αiL-B [400V] Standard induction	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*
Maximum speed [rpm]		1000		10000 20000	10000		8000 12000		8000	8000 10000		8000 10000				6000 7000		5000		
αiLP-B [200V] Wide constant power range						*	*	*	*	*	*	*								
Maximum speed [rpm]							8000				6000	5000 6000								
αiLP-B [400V] Wide constant power range							*		*		*	*								
Maximum speed [rpm]							8000		8000		6000	5000 6000								
αiLT-B [200V] Coolant through			*	*	*	*	*		*	*	*	*								
Maximum speed [rpm]			20000	20000 24000	12000 20000	12000 15000			12000	15000		10000								
αiLT-B [400V] Coolant through			*	*	*	*	*			*	*	*								
Maximum speed [rpm]			20000			12000					15000	10000								
αiLL-B [200V] Liquid cooled										*	*	*		*						
Maximum speed [rpm]										20000	15000		15000							
αiLL-B [400V] Liquid cooled										*	*	*		*						
Maximum speed [rpm]										20000	15000		15000							

Рис. 9.2.1 Таблиця варіантів шпиндельних вузлів FANUC

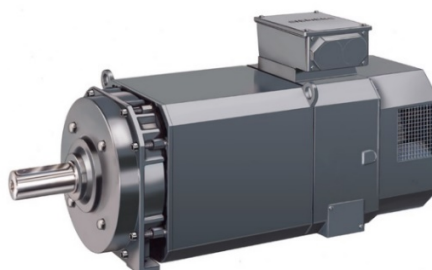
Нам необхіден з запропонованих в Рис. 7.1.1б варіант з швидкістю в 12000 об / хв, або вище, а саме: FANUC 0i-B 22/12000i

## SIEMENS

Power factor $\cos \varphi$	Magnetizing current $I_{\mu}$ A	Efficiency $\eta_{rated}$	Rated frequency $f_{rated}$ Hz	Moment of inertia of $J$ $\text{kgm}^2 / \text{lb}_\text{f}\text{-in-s}^2$	Weight, approx. kg/lb	1PH7 asynchronous motor Order No.	SINAMICS S120 Motor Module Rated output current $I_{rated}$ A	Order No.
400 V 3 AC line voltage, Servo Control								
0.88	11.5	0.809	14.3	0.185/1.637	175/385.9	1PH7163-...B... ■■■	30	6SL3120-1 TE23-0AA 1
0.88	14.0	0.814	14.3	0.228/2.018	210/463	1PH7167-...B... ■■■	45	6SL3120-1 TE24-5AA 1
0.82	4.8	0.794	35.6	0.017/0.15	40/88.2	1PH7103-...D... ■■■	9 <sup>B)</sup>	6SL3120-1 TE21-0AA ■
0.81	9	0.822	35.3	0.029/0.257	65/143.33	1PH7107-...D... ■■■	18	6SL3120-1 TE21-8AA ■
0.86	13	0.865	34.8	0.076/0.673	90/198.5	1PH7133-...D... ■■■	30	6SL3120-1 TE23-0AA 1
0.86	19	0.878	34.6	0.109/0.965	150/330.8	1PH7137-...D... ■■■	45	6SL3120-1 TE24-5AA 1
0.85	24	0.899	34.2	0.185/1.637	175/385.9	1PH7163-...D... ■■■	60	6SL3120-1 TE26-0AA 1
0.84	33	0.903	34.2	0.228/2.018	210/463	1PH7167-...D... ■■■	85	6SL3120-1 TE28-5AA 1
0.74	5.9	0.847	51.6	0.017/0.15	40/88.2	1PH7101-...F... ■■■	9 <sup>B)</sup>	6SL3120-1 TE21-0AA ■
0.84	5.4	0.832	52.7	0.017/0.15	40/88.2	1PH7103-...F... ■■■	18	6SL3120-1 TE21-8AA ■
0.78	9.4	0.866	51.7	0.029/0.257	65/143.33	1PH7105-...F... ■■■	18	6SL3120-1 TE21-8AA ■
0.80	11.0	0.859	52.0	0.029/0.257	65/143.33	1PH7107-...F... ■■■	30	6SL3120-1 TE23-0AA 1
0.88	8.4	0.896	51.3	0.076/0.673	90/198.5	1PH7131-...F... ■■■	30	6SL3120-1 TE23-0AA 1
0.85	14	0.895	51.3	0.076/0.673	90/198.5	1PH7133-...F... ■■■	45	6SL3120-1 TE24-5AA 1
0.85	17	0.902	51.1	0.109/0.965	150/330.8	1PH7135-...F... ■■■	45	6SL3120-1 TE24-5AA 1
0.85	23	0.900	51.2	0.109/0.965	150/330.8	1PH7137-...F... ■■■	60	6SL3120-1 TE26-0AA 1
0.85	30	0.912	50.9	0.185/1.637	175/385.9	1PH7163-...F... ■■■	85	6SL3120-1 TE28-5AA 1
0.86	32	0.916	50.8	0.228/2.018	210/463	1PH7167-...F... ■■■	85	6SL3120-1 TE28-5AA 1
0.80	8.3	0.857	68.9	0.017/0.15	40/88.2	1PH7103-...G... ■■■	18	6SL3120-1 TE21-8AA ■
0.80	12	0.869	68.6	0.029/0.257	65/143.33	1PH7107-...G... ■■■	30	6SL3120-1 TE23-0AA 1
0.86	18	0.898	68.0	0.076/0.673	90/198.5	1PH7133-...G... ■■■	45	6SL3120-1 TE24-5AA 1
0.88	21	0.903	68.0	0.109/0.965	150/330.8	1PH7137-...G... ■■■	60	6SL3120-1 TE26-0AA 1
0.84	37	0.906	67.5	0.185/1.637	175/385.9	1PH7163-...G... ■■■	85	6SL3120-1 TE28-5AA 1
0.84	40	0.907	67.4	0.228/2.018	210/463	1PH7167-...G... ■■■	85 <sup>B)</sup>	6SL3120-1 TE28-5AA 1

Рис. 9.2.2а Таблиця варіантів шпиндельних вузлів SIEMENS

В представлений таблиці, представленні шпиндельні вузли з швидкістю 12000 об / хв. Отже по критеріям які ми отримали в розрахунках обираємо SIEMENS: 1PH7133.



## **Huazhong CNC**

## **Weiss GmbH**

Weiss Spindeltechnologie GmbH пропонує найбільш повний і передовий асортимент продукції в області шпиндельних технологій: будь-то токарна, фрезерна, шліфувальна обробка, спеціальні додатки, мотор-шпинделі, зовнішні приводи, роликові і рідинні підшипники. Компанія Weiss GmbH була заснована Зігфрідом Вайсом в 1993 році. Тоді її штат налічував 77 співробітників. У 2001 році назва підприємства змінено на Weiss Spindeltechnologie GmbH - компанія Siemens. Weiss GmbH прийняла цінності і бачення перспективи від материнської групи. У 2002 році створюється база обслуговування шпинделів Weiss Siemens в графстві Чешир, Великобританія. У 2004 році компанія розширюється до Південної Америки шляхом створення бази обслуговування в Сан-Паулу, Бразилія. У 2006 році відкривається база обслуговування шпинделів Siemens Weiss GmbH в Пекіні, Китай; в 2007 - в Бангалорі, Індія; в 2008 - в Барі, Італія. У 2012 році виконано розширення виробництва в Німеччині. Як лідер ринку в області шпиндельних технологій, Weiss Spindeltechnologie GmbH встановлює стандарти для розвитку шпиндельних вузлів для верстатів. Weiss GmbH пропонує інноваційні рішення та нові підходи в розробці і виготовленні шпинделів, як стандартних серій, так і індивідуального дизайну (більше 250 типів розроблених на замовлення шпинделів токарних верстатів, 100 шпинделів шліфувальних верстатів і 1000 шпинделів фрезерних верстатів). Особливо затребувана продукція Weiss в Україні, адже ціна на шпиндель для фрезерного верстата від даного виробника вельми приваблива.

Шпинделі фрезерних верстатів, технічні дані:

-Номінальна потужність - до 130 кВт;

-Крутний момент - до 3300 Нм;



- Максимальна швидкість - 60 000 хв-1;
- Номенклатура шпинделів фрезерних верстатів: шпинделі з прямим приводом (мотор-шпинделі) шпинделі з окремим приводом;
- Синхронні двигуни;
- Асинхронні двигуни шпинделі з роликовими підшипниками система заміни мастила;
- Довговічна система мастила Масляна / пневмо мастило;
- Без вбудованої передачі;
- З вбудованою передачею (до 1:04);
- Широкий спектр інструментальних блоків, включаючи HSK і ISO.

Motor Type	Rated Power Kw	Rated Torque Nm	Rated Current A	Rated Rotary Speed r/min	Maximum Speed * r/min	Rotating Inertia Kgm <sup>2</sup>	Weight Kg	Adaptive Spindle Drive
GM7100-4SB61	2.2	14	6	1500	6000/9000	0.015	25	HSV-180S-25/2.5
GM7101-4SB61	3.7	23.6	10	1500	6000/9000	0.02	35	HSV-180S-35/2.1
GM7102-4SB61	3.0	19.1	8	1500	6000/9000	0.015	25	HSV-180S-35/2.6
GM7103-4SA61	3.7	35.3	10	1000	6000/9000	0.02	35	HSV-180S-35/2.1
GM7103-4SB61	5.5	35	13	1500	6000/9000			HSV-180S-50/2.3
GM7103-4SC61	7.5	35.8	18.8	2000	6000/12000			HSV-180S-75/2.3
GM7105-4SB61	7.5	47.8	18.8	1500	6000/8000	0.032	55	HSV-180S-75/2.3
Motor Type	Rated Power Kw	Rated Torque Nm	Rated Current A	Rated Speed r/min	Maximum Speed * r/min	Rotating Inertia Kgm <sup>2</sup>	Weight Kg	Adaptive Spindle Drive
GM7107-4SA61	6.3	60.2	19.4	1000	6000/8000	0.032	55	HSV-180S-75/2.2
GM7130-4SB61	5.5	35	13	1500	6000/8000	0.042	78	HSV-180S-50/2.3
GM7132-4SB61	7.5	47.8	18.8	1500	6000/8000	0.042	78	HSV-180S-75/2.3

Рис. 9.2.36 Таблиця варіантів шпиндельних вузлів HuazhongGSK

Отже обираємо шпиндельний вузол HuazhongGSKGM7103-4SC61.



## Lagerungstechnik Fraureth GmbH

Мотор- шпиндели типового ряда FS для фрезерования и сверления



Рис. 9.2.4а Зовнішній вигляд Lagerungstechnik Fraureth GmbH

Тип шпинделя	Данные мощности							Система крепления	Смазка
	$n_N$ мин <sup>-1</sup>	$n_{max}$ мин <sup>-1</sup>	$f_{max}$ Гц	$P_N$ (S1) кВт	$P_{max}$ (S1) кВт	$I$ А	$M_N$ Нм		
FS 80-40/3	30 000	40 000	1 334	4	4	8	1,05	HSK 25 C	жир
FS 120-40/7	30 000	40 000	1 334	7	7	21	2,2	HSK 25 C	жир
FS 150-30/16	20 000	30 000	1 000	15	15	34	4,9	HSK 32 C	жир
FS 170-12/16	8 000	12 000	400	15	16	38	18	HSK 63 C	жир
FS 170-18/22	12 000	18 000	600	22	22	60	17	HSK 50 C	жир
FS 170-24/20	9 800	24 000	800	20	20	42	19,5	HSK 63 C	жир
FS 230-10/25	4 000	10 000	500	25	25	80	90	HSK 80 C	жир
FS 300-4/28	1 400	4 000	200	28	28	89	206	HSK 80 C / SK 50	жир
FS 375-4/29	450	4 000	270	26	29	140	550	HSK 125 C	жир

Рис. 9.2.3б Таблиця варіантів шпиндельних вузлівLFGmbH

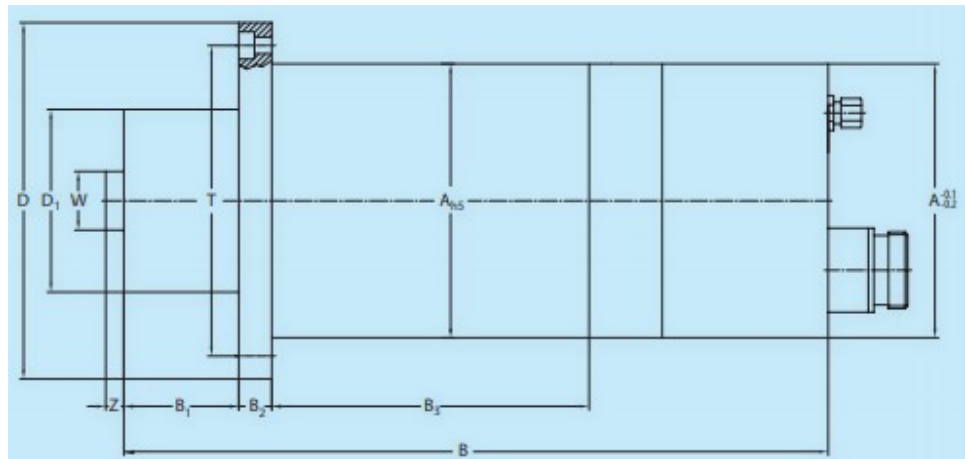


Рис. 9.2.4в Розміри для серії MF / MS

ип шпи ндел я	Розміри в мм									
S 300- 4/28	5	4	00	20		110	65	5	40	
S 375- 4/29	20		75	45		60	20	0	25	

Приналежності для типових рядів MF / FS:

Перетворювачі частоти.

Як правило рекомендується надавати перевагу перетворювачі з завданням основної частоти (PAM) в порівнянні з перетворювачами типу PWM,

тому що вони створюють менше навантаження на шпиндельний двигун і викликають зменшене розсіяне тепло, в основному в роторі.

Датчики частоти обертання.

Всі названі мотор шпинделі опціонально оснащуємо з датчиком частоти обертання.

Система змазки.

Масляно - повітряна система. Система включає в себе манометр / манометрический вимикач для моніторингу тиску повітря і вимикач для перевірки рівня наповнення масла (поплавковий вимикач). можна варіювати необхідну кількість масла за допомогою регулювання ходу поршня і часу цикл в широких діапазонах. Рекомендуємо масляновоздушную систему фірми SKF Berlin або фірми Eugen Woerner Wertheim.

Охолоджувальний пристрій.

Рекомендуємо застосування автономного пристрою, оснащеного збіркою і приладом для контролі потоку, для охолодження шпинделя. застосуйте тільки бесшелевую і пом'якшену воду, при добавці засобів уповільнюють корозію. Температура лінії лінії для охолоджуючого кошти повинна бути не менше 20 ° C, в іншому випадку виникає небезпека утворення конденсату. Рекомендується, щоб температура рециркуляції не перевищувала 35 ° C. Обробка стисненого повітря. Потрібно фільтрувати і осушувати стиснене повітря. Як замикаючого повітря і для очищення конуса шпиндельним вузлом для змащення і змін інструменту.

Шліфувальні оправлення.

Фірма SLF також на вимогу поставляє шліфувальні оправлення.

Інструкції з експлуатації видаються німецькою та англійською мовами.

HARDY

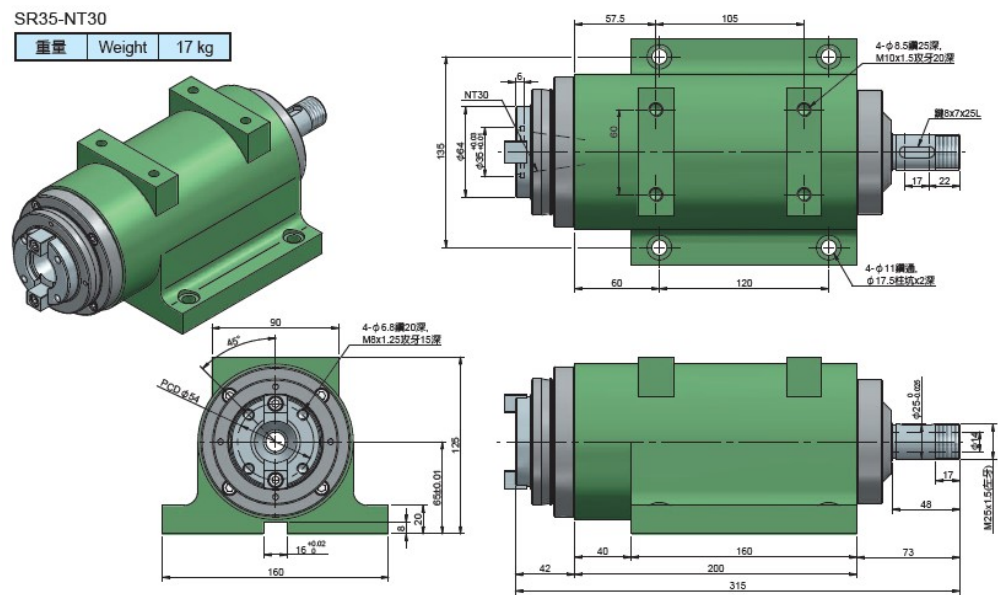


Рис. 9.2.26 Креслення SR35H

Model	SR35	SR35H
Spindle	NT30	
Max.RPM	3000	12000
Bearing	32207 / 6207Z 32206	7207×2 7206×1
Roundness	Within 0.003mm 内	
Max. Power	Within 2 HP 内	
Rising Temperature	Within 20°C 内	

Рис. 9.2.46 Варианты шпинделів HARDY

HSD



Рис 9.2.1а Зовнішній вигляд HSD ES501-ISO40

$n_N = 8000$  об / хв;

$n_{max} = 12000$  об / хв;

$P_N (S1) = 22$  кВт;

$P_{max} (S1) = 26$  кВт;

$I = 380$  А;

$M_N = 105/126$  Нм/

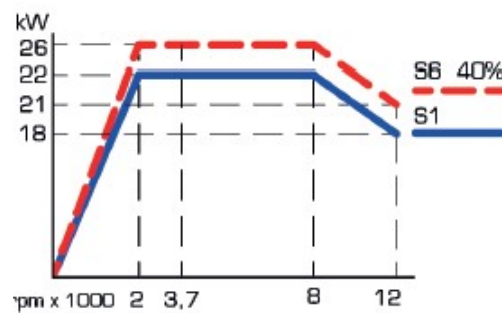


Рис 9.2.1б Графік роботи HSD ES501-ISO40

Висновок:

За допомогою розрахункових схем, та теоретичного аналізу інформаційних джерел варіант з представлених, а саме Lagerungstechnik Fraureth GmbH FS 375-4/29. Він відповідає усім заявленим характеристикам, а деякі навіть перевершує.

Він має наступні характеристики:

$n_N = 12000 \text{ об / хв};$

$n_{\max} = 18000 \text{ об / хв};$

$f_{\max} = 600 \text{ Гц};$

$P_N (S1) = 22 \text{ кВт};$

$P_{\max} (S1) = 22 \text{ кВт};$

$I = 60 \text{ А};$

$M_N = 17 \text{ Нм};$

Система кріплення: HSK 50 C;

Змащування: жир.

В цьому шпинделі використанні передові технології. Великою перевагою є використання гібридних керамічних підшипників, та використання точного обладнання для виготовлення усіх компонентів шпиндельного вузла.



Рис. 9.3 Lagerungstechnik Fraureth GmbH FS 375-4/29

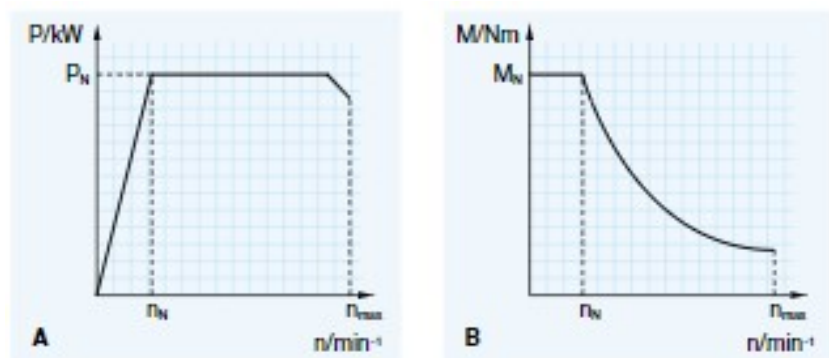


Рис. 9.4 Параметри робочого циклу



## 10. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Сьогоднішній розвиток комп'ютерних технологій дозволив нам отримати спеціалізовані програми для розрахунку щопитижельних вузлів. Вони забезпечують швидкість та точність розрахунків, майже прибирається варіант людської похибки. Розглянемо декілько програм.

Ускладнення розрахунків шпindelьних вузлів на жорсткість і опір пластичним деформаціям з урахуванням розподілу та режимів зміни напружень, розмірів і перетинів, побудова комплексних математичних моделей вимагає застосування розвинених систем автоматизованого проектування. Одним з ефективних засобів вирішення трудомістких проектних завдань по створенню оптимальних машинобудівних конструкцій є CAD / CAE / PDM САПР АРМ WinMachine.

Розглянемо задачу розрахунку жорсткості конструкції шпиндельного вузла (шпиндель - модульна оснащення) приводу головного руху багатоцільового токарного верстата моделі MC03, конструктивна схема якого представлена на рис.10.1.

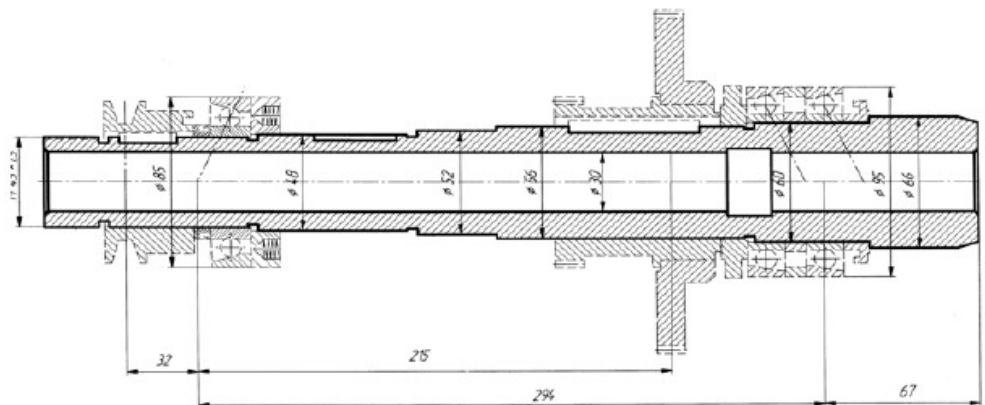




Рис. 10.1 Шпиндель з оснасткою

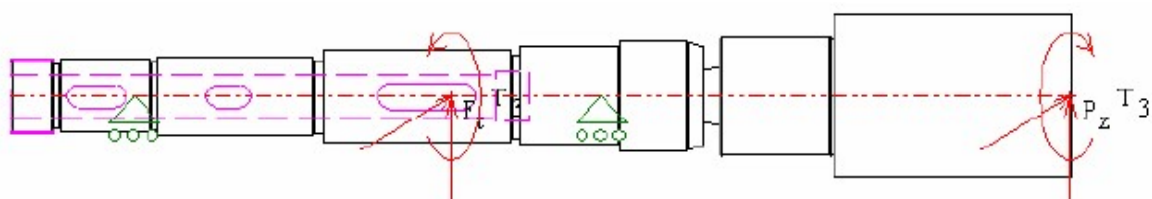


Рис. 10.2 Схема та зображення нагруження шпиндельного вузла верстату MC03 в модулі «APM Shaft»

**Характеристика нагруження**  
**Радіальні сили**

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Модуль, Н	Угол, град
0	276.00	3145.71	9.00
1	662.00	1847.22	25.01

**Моменты кручения**

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Значение, Нхм
0	276.00	226.00
1	662.00	-226.00

**Реакции в опорах**

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Реакция верт., Н	Реакция гориз., Н	Реакция осевая, Н	Модуль, Н	Угол, град
0	78.00	692.55	629.13	0.00	935.64	47.75
1	369.00	-5473.55	-1902.13	0.00	5794.64	-109.16

Таблиця 10.1 Величини реакції

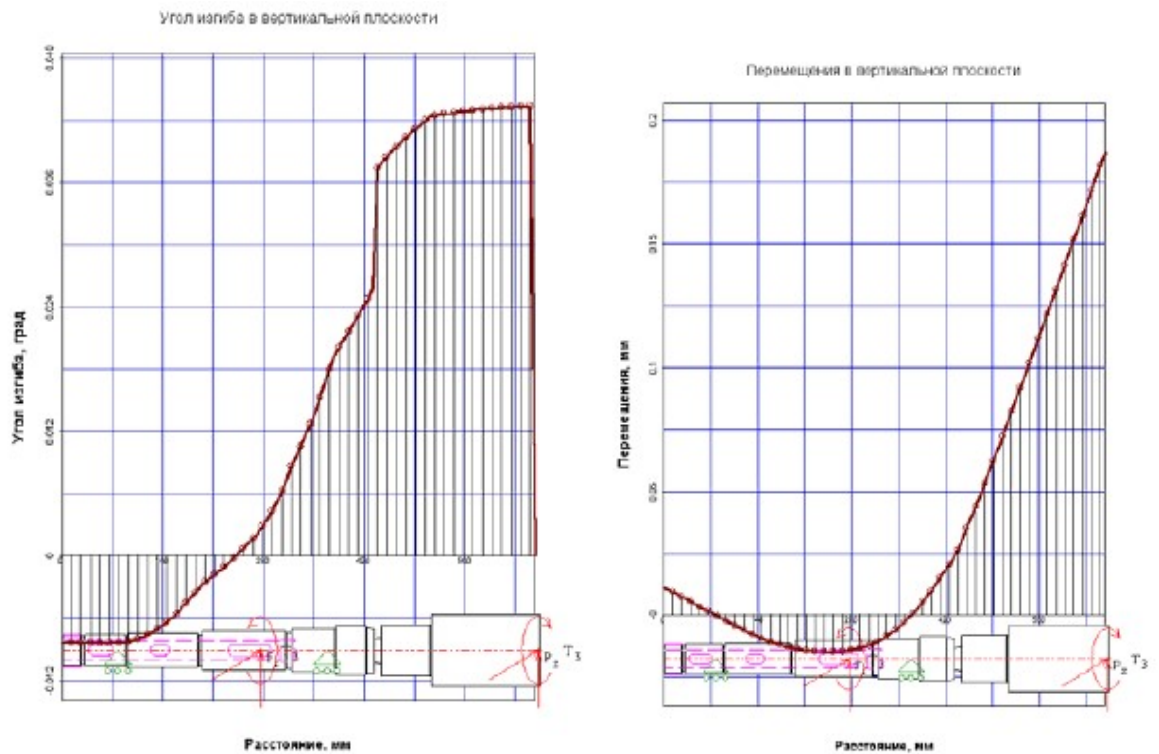


Рис. 10.3 Розрахунок шпинделя верстата MC 03 в САПР «APM WinMachine»

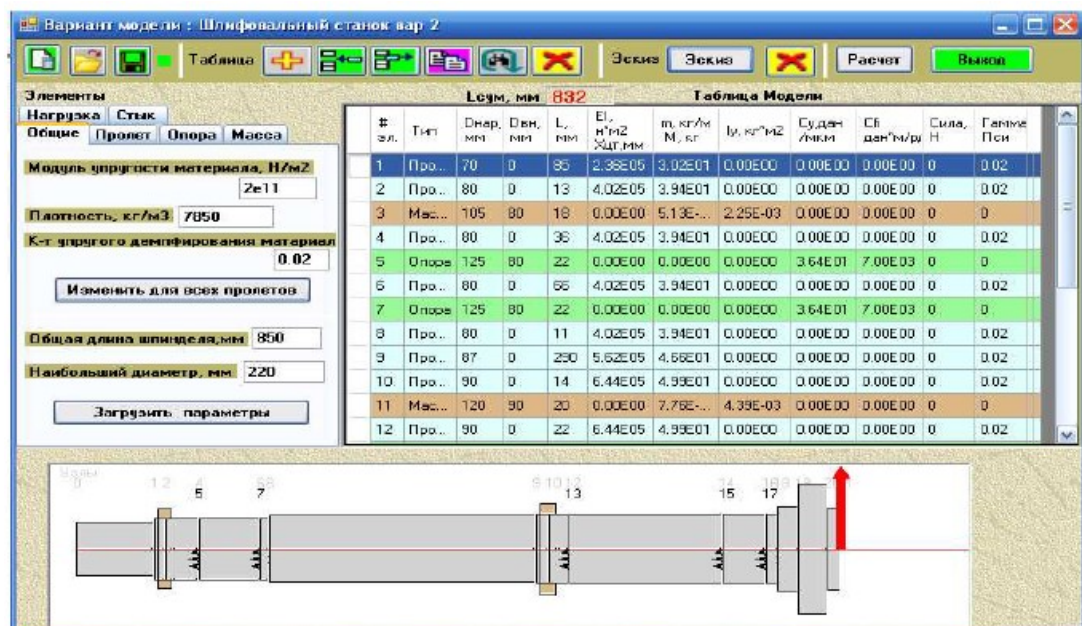


Рис. 10.4 Робоче вікно програми і розрахункова модель шпиндельного вузла (SpinDyna\_FE)

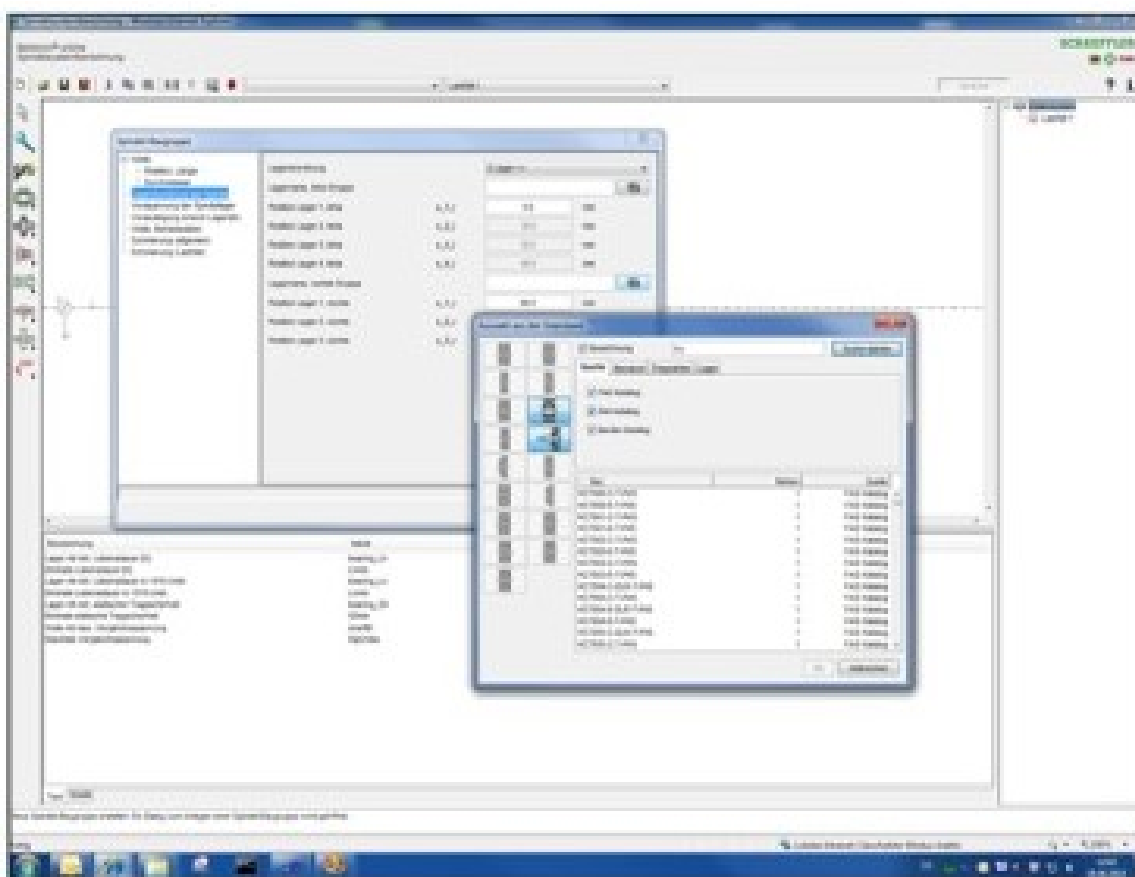


Рис. 10.5а Интерфейс программы BEARINX-online

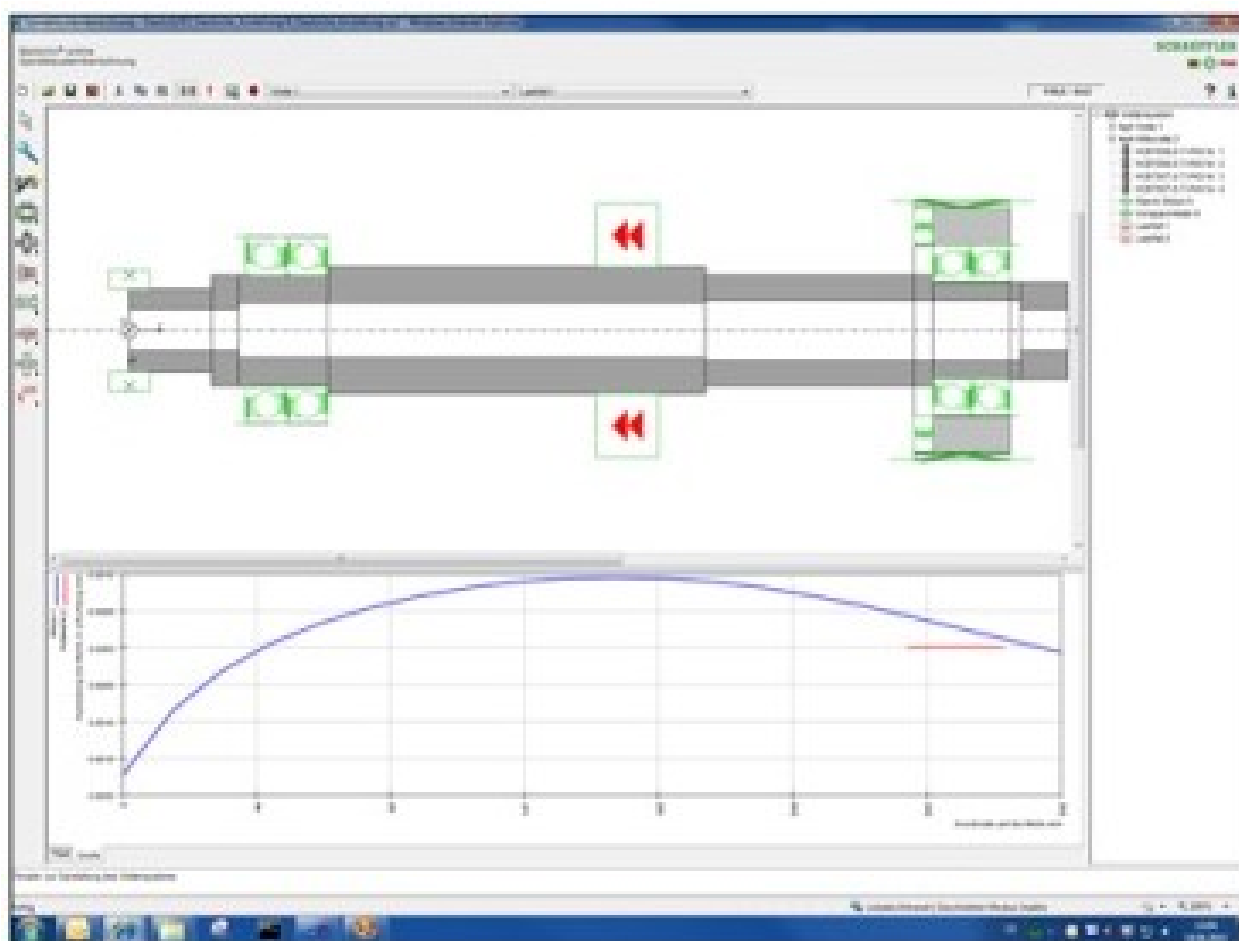


Рис. 10.56 Интерфейс програми BEARINX-online

#### Висновок:

Для вирішення поставленої задачі а саме для збільшення швидкохідності шпиндельного вузла верстату VDL-500 ФІРМИ DMTG на базі використання модульного мехатронного вузла було виконано наступне. Розглянута конструкція верстата, дослідженні мехатронні шпиндельні вузли які використовують як у нових верстатах та роботах, так і при осучасненні верстатів і роботів, які знаходяться в експлуатації. Провели дослідження ринку модульних вузлів в Україні (основні виробники, чия продукція представлена) та вибір альтернативних мехатронних шпиндельних вузлів різних виробників. Огляд методик розрахунку високошвидкісних шпиндельних вузлів, особливостей проектування їх різними фірмами-виробниками.

Виробник пропонує варіанти заміни шпиндельного вузла але ми поставили перед собою задачу забезпечити більшу частоту обертання до 12000 об / хв  
Здійснено статичний розрахунок ШВ базового верстату, обрано з аналізу високошвидкісний шпиндельний вузел з інтегрованим двигуном фірми Lagerungstechnik Fraureth GmbH.

### Список використаної літератури:

1. Кочергин, А. И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и ста-ночных комплексов. Курсовое проектирование/А. И. Кочергин. - Минск: Вышэйшая школа, 1991. – 382 с.
2. Кочергин, А. И., Василенко, Т.В. Шпиндельные узлы с опорами качения: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию металлорежущих станков для студентов машиностроительных специальностей/ А.И.Кочергин, Т.В.Василенко. - Минск: БНТУ, 2007. – 124с.
3. Бушуев, В. В. Металлорежущие станки. В 2-х томах. / В. В. Бушуев – Москва: Издательство “Станкин”, 2011. – 608 с.
4. Ничипорчик С.Н., Корженчевский М.И., Калачев. Детали машин в примерах и задачах. - Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 432 с.
- Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах/В. И. Анурьев.- Москва: Машиностроение, 1982. -Т.2. -584 с.; Т.3. - 576 с.
5. Гузеев, В. И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением/ В.И. Гузеев. – Москва: Машиностроение, 2005.- 365 с.
6. Скойбеда, А. Т. Детали машин проектирование/ А.Т. Скойбеда. – Минск: УП «Технопринт», 2005. – 296 с.
7. Таловеров, В.Н. Кузнечно-штамповое оборудование./В. Н. Таловеров, И.Н. Гудков, А.В. Таловеров - Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 145с.
8. Интернет видання: «<https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=26801>» .
9. Интернет видання: <http://stanki-uchpu.ru/shpindelnye-ustrojstva/>.
10. Каталог: <https://www.slf-fraureuth.de/wp-content/uploads/2015/11/MotorspindelInRUk.pdf>

11. Каталог:  
<https://www.stankim.com/uploads/files/0n/ir/yi/5b76783808b46.pdf>.
12. Каталог:  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/809/44479809/att\\_20871/v1/PFE1S\\_0610\\_en\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/809/44479809/att_20871/v1/PFE1S_0610_en_en-US.pdf).
13. Інтернет видання <https://stanko-arena.ru/article/shpindelnye-uzly.html>.
14. Каталог: [http://www.precise-rotation.ru/WEISS\\_SPINDEL/WEISS\\_SWSS\\_3.pdf](http://www.precise-rotation.ru/WEISS_SPINDEL/WEISS_SWSS_3.pdf)
15. Каталог:  
<http://www.huazhongcnc.com/UploadFiles/Files/lilinlin/201112/Series%20HSV-180S%20AC%20Spindle%20Drive%20Unit%20User%27s%20Manual.pdf>.
16. Інтернет видання: <http://www.huazhongcnc.com/en/Product/Servo-Motors.aspx>.
17. Каталог: <https://www.slf-fraureuth.de/wp-content/uploads/2015/11/MotorspindelnRUk.pdf>.

## Додаток

### Структура вузлів і типові схеми компоновок

На рис. 1.1 представлена схема основних складових частин агрегатних верстатів (АВ) будь-якого компонування.

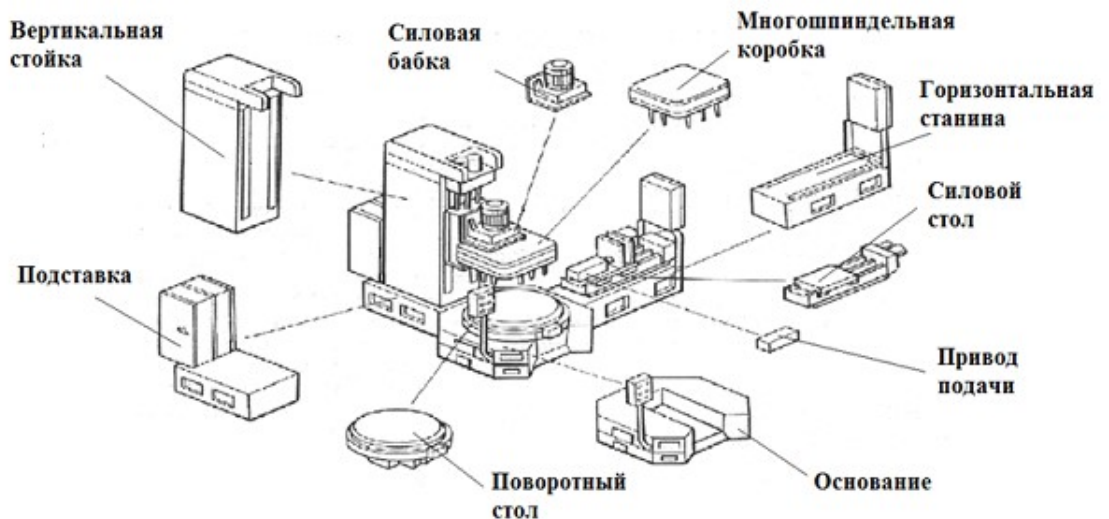


Рис. 1.1 Структура агрегатных узлов

Несучої частиною АВ є вертикальна стійка з направляючими, по яких переміщається каретка (силовий стіл), що має власний привід подачі. Залежно від прийнятої концепції конструювання, привід подачі може бути механічний (асинхронний одношвидкісний з гвинтовою парою, перетворюючої обертальний рух в поступальний), гідравлічний або пневматичний. На каретці розміщується силова бабка, поєднана з багатошпиндельною коробкою. До складу силової бабки входить електродвигун, редуктор, розміщений в корпусі, і вихідний вал, що передає обертальний рух на багатошпиндельних коробку. Кількість і розташування шпинделів багатошпиндельною головки визначається оброблюваної деталлю.

Для горизонтального розташування силового столу є горизонтальні станини, на спеціальному кронштейні якого (нагорі) є електрична шафа управління горизонтальної головкою. Силовий стіл горизонтального виконання



конструктивно аналогічний столу вертикального виконання. Виконавчий шпиндель в горизонтальному варіанті АВ може бути також багатошпиндельні або одношпиндельних, наприклад, розточувальним, як це показано на малюнку.



Рис. 1.2 Типові схеми компоновок АС

Центральну частину АВ становить підставу (станина) з пультом управління, на яке встановлюється поворотний ділильний стіл. Цей стіл призначений для установки і закріплення оброблюваної деталі в пристосуванні (на малюнку не показаний), а також для здійснення повороту (ділення) оброблюваних деталей в позиції обробки. Кількість поділок поворотного столу визначається технологічною необхідністю. Зазвичай це кількість дорівнює 2, 4, 6, 8. Вертикальна стійка базується на станині підставці, в вільній задньої частини якої кріпиться шафа управління верстатом.

На основі заздалегідь спроектованих агрегатних вузлів можна практично компонувати необмежену кількість АВ. Ці верстати за своїм призначенням належать до спеціальних верстатів, оскільки вони здатні обробляти деталі тільки

(в основному) одного найменування і великого річного обсягу. Ефективність роботи таких верстатів можливо тільки в тому випадку, якщо їх завантаження буде становити не менше 80% річного фонду роботи обладнання. На рис. 1.2 представлена загальна класифікація компоновок АВ.

Перший ряд АВ заснований на компонуванні з поворотним столом, другий - з поворотно-ділильні барабанів, вісь обертання якого горизонтальна і третій - з прямолінійним переміщенням оброблюваних деталей.

Згодом ці компонування знайшли відображення у компоновках обробних центрів та багатоцільових верстатів, створених за модульним принципом.